

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Методи та засоби керування
безпілотним літальним апаратом

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-21-2
Іваненко Ю.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Філімончук Т.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

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

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Іваненко Юлії Вікторівні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Методи та засоби керування безпілотним літальним апаратом _____

затверджена наказом по університету від “ 03 ” квітня 2023 р. № 318 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 17 травня 2023 р.

3. Вхідні дані до роботи _____ 1) БПЛА; 2) інтелектуальні режими керування БПЛА;
_____ 3) знімки з тепловізійної камери _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1) огляд сфер застосування БПЛА та їх класифікації;

2) аналіз методів керування БПЛА;

3) виявлення недоліків комерційних рішень;

4) розробка інтелектуального методу керування;

5) проведення експериментальних досліджень;

б) висновки.

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

Слайд-презентація – 18 слайдів _____

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сфер застосування БПЛА та дослідження їх класифікації	03.04.23-11.04.23	
2	Аналіз методів управління БПЛА	12.04.23-20.04.23	
3	Аналіз програмно-апаратного комплексу	21.04.23-26.04.23	
4	Дослідження недоліків комерційних дронів	27.04.23-30.04.23	
5	Розробка інтелектуального режиму керування		
6	Проведення експериментів	1.05.23-05.05.23	
	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	06.05.23-10.05.23	
	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	10.05.23-11.05.23	
	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	12.05.23-16.05.23	

Дата видачі завдання 03 квітня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Філімончук Т.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 99 с., 46 рис., 3 табл., 1 дод., 31 джерел.

БПЛА, МЕТОДИ КЕРУВАННЯ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РЕЖИМИ УПРАВЛІННЯ, GPS, ПОРОГОВА ОБРОБКА.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка інтелектуального методу керування для виявлення пожежі та визначення її GPS координат.

Об'єктом дослідження в даній роботі є безпілотний літальний апарат, який використовується для виявлення пожежі та визначення її GPS координат.

Предметом дослідження є розробка інтелектуального методу керування безпілотним літальним апаратом, який дозволяє виявляти пожежу та визначати її місцезнаходження за допомогою GPS координат.

Основний акцент дослідження зроблено на розробку алгоритму, що дозволить безпілотному літальному апарату ефективно працювати в умовах пожежі та встановлювати місцезнаходження пожежі.

Виконано імітаційне моделювання запропонованого методу у середовищі MatLab.

ABSTRACT

Master's thesis: 99 pages, 46 figures, 3 tables, 1 appendices, 31 sources.

UAVS, CONTROL METHODS, INTELLIGENT CONTROL MODES, GPS, THRESHOLD PROCESSING.

The purpose of the qualification work is to develop an intelligent control method for detecting a fire and determining its GPS coordinates.

The object of study in this work is an unmanned aerial vehicle used to detect a fire and determine its GPS coordinates.

The subject of the study is the development of an intelligent method for controlling an unmanned aerial vehicle that allows you to detect a fire and determine its location using GPS coordinates.

The main research focus is on the development of algorithm that allows an unmanned aerial vehicle to operate effectively in fire conditions and to establish the location of the fire.

Simulation modeling of the proposed method was performed in MatLab.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ БПЛА	10
1.1 Аналіз сфер застосування БПЛА.....	10
1.2 Класифікація БПЛА	18
1.3 Застосування квадрокоптерів для профілактики та гасіння пожеж	24
2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ БПЛА	27
2.1 Математична модель БПЛА.....	27
2.2 Методи управління БПЛА.....	31
2.3 Місце GPS позиціонування в інтелектуальних методах управління.....	38
2.4 Інтелектуальні польотні режими БПЛА	41
3 АНАЛІЗ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ БПЛА ДЛЯ ЗАДАЧ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ	48
3.1 Методи виявлення вогню на зображенні.....	48
3.2 Аналіз апаратної частини.....	50
3.3 Аналіз програмної частини	56
3.4 Комерційні пожежні БПЛА та їхні недоліки	59
4 РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ GPS КООРДИНАТ ПОЖЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА	65
4.1 Загальна концепція інтелектуального режиму для гасіння пожежі	65
4.2 Метод виявлення вогню за фотографією місцевості.....	68
4.3 Метод визначення GPS координат пожежі	75
4.4 Результати роботи методу	79
ВИСНОВКИ.....	84

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	86
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

СК – система керування

РТК – різнорідний робототехнічний комплекс

СНС – супутникова навігаційна система

GPS – система глобального позиціонування (англ. Global Positioning System)

РЕБ – радіоелектронна боротьба

DD – десяткові градуси (англ. decimal degrees)

ВСТУП

В сучасному світі безпілотні літальні апарати стають все більш популярними у різних галузях. Ці автономні системи вже успішно застосовуються для моніторингу земної поверхні, пожеж, дослідження навколишнього середовища, пошуку та рятування людей, а також для військових цілей.

Розширення можливостей створює і додаткові труднощі, такі як, наприклад, необхідність забезпечити управління БПЛА в автономному режимі без застарілого підходу керування «людина-безпілотник», де візуальну інформацію обробляє людина-спостерігач.

Важливий напрямок застосування дронів – це пожежна безпека, де вони використовуються для профілактики пожеж і раннього виявлення загорянь.

Метою даної роботи є розробка інтелектуального методу керування, який дозволить виявляти та ліквідувати пожежу без залучення людини у процес, та забезпечить ефективну роботу моніторинга природніх масивів та зменшить ризики пов'язані з участю людини в процесі керування.

У роботі проводиться аналіз теоретичних та практичних аспектів керування БПЛА, включаючи основні принципи керування, засоби управління та існуючі інтелектуальні режими.

Аналіз показав, що є необхідність в розробці спеціального інтелектуального режиму виявлення вогню та визначення його GPS координат, оскільки комерційні дрони на ринку не мають подібних рішень.

1 АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ БПЛА

1.1 Аналіз сфер застосування БПЛА

Безпілотний літальний апарат – це літальний апарат без екіпажу на борту. БПЛА можуть мати різний ступінь автономності – від керованих дистанційно до повністю автоматичних, а також відрізнятися за конструкцією, призначенням, тощо [1].

В останні десять років БПЛА набули великої популярності, особливо в найбільш розвинених державах світу. Сфера застосування безпілотників досить широка. Вони можуть виконувати моніторинг дорожньої ситуації, як міської, так і на віддалених ділянках, вести контроль за пожежною ситуацією в лісах або за паводковими водами в регіонах та інше [1].

Найбільш відомим є поділ, у якому дрони підрозділяються за сферами їхнього застосування, а конкретніше, для дослідницьких і прикладних цілей, а також для цивільного і військового застосування (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Сфери застосування БПЛА

У сфері наукової діяльності БПЛА застосовують для:

- моніторингу земної поверхні;
- моніторингу повітря, води;
- геофізичних, геологічних та біологічних досліджень;

Військові безпілотники класифікуються за функціональними ознаками:

- спостережні (можуть використовуватися, зокрема, для коригування вогню на полі бою);
- розвідувальні;
- ударні (для ударів по наземних цілях за допомогою ракетного озброєння);
- розвідувально-ударні;
- бомбардувальні;
- винищувальні (для знищення повітряних цілей);
- радіотрансляційні;
- БПЛА РЕБ (для цілей радіоелектронної боротьби);
- транспортні;
- БПЛА-мішені;
- БПЛА-імітатори цілі;
- багатоцільові БПЛА [2].

У цивільному напрямку сфери застосування безпілотників наступні:

- сільське господарство;
- будівництво;
- сектор безпеки;
- транспортування та доставка;
- фото-, відеозйомка;
- інші комерційні проекти.

Розглянемо більш детально застосування БПЛА для прикладних задач.

1 Спектрозональна зйомка.

Вид фотозйомки, у процесі якої відбувається одночасне отримання фотографічних зображень об'єкта в різних ділянках (зонах) спектра електромагнітних хвиль.

Наприклад, у сільському господарстві використання БПЛА дає змогу отримати модель місцевості з роздільною здатністю до 3 см. Знімки отримують у видимому та інфрачервоному діапазонах. Така зйомка дає вичерпну картину про стан ґрунтів, а детальність дає змогу контролювати посіви з точністю до 5 см. Широкий спектр одержуваних даних дає змогу оцінювати проблеми полів по сходах і виявляти причини найрізноманітніших проблем [3].

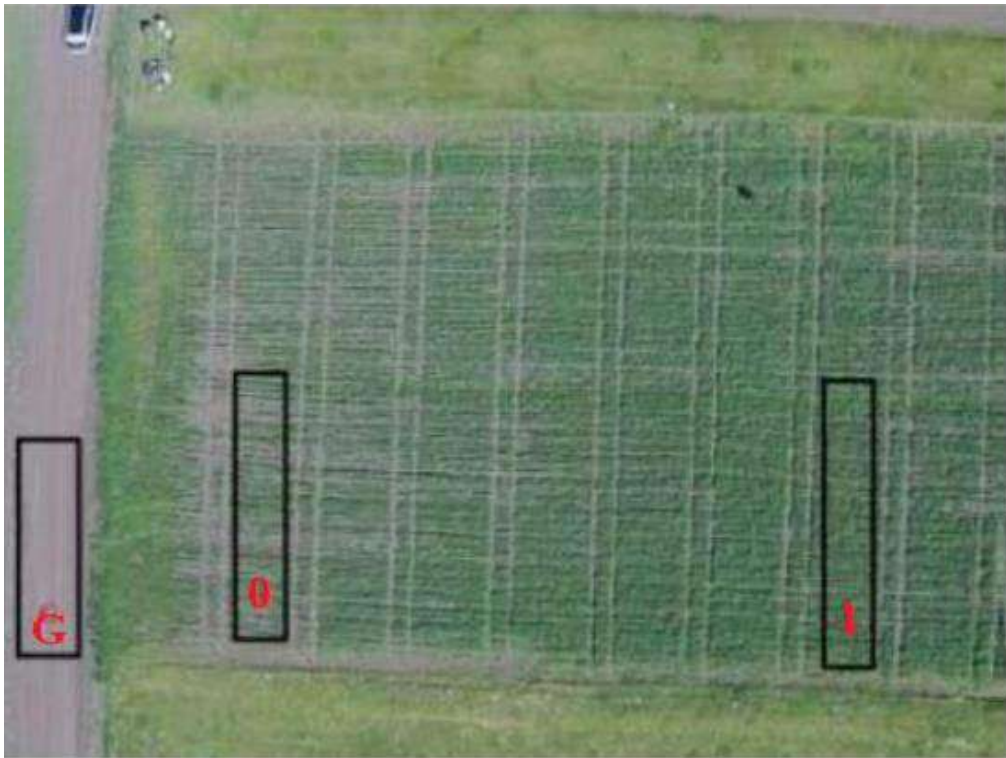


Рисунок 1.2 – Фотознімок дослідного стаціонарного поля пшениці озимої ділянки: G – ґрунтова дорога, 0 – ділянка без добрив (контроль), 1 – внесено рекомендовану норму добрив [3].

2 Аерофотозйомка місцевості.

Це комплекс робіт, що включає різні процеси від фотографування земної поверхні з БПЛА, до отримання аерофотознімків, фотосхем або фотопланів знятої місцевості. Усі аерофотознімальні матеріали використовуються для вирішення цілої низки питань у галузі лісового господарства та лісової промисловості.

При плановій зйомці камера спрямована вертикально вниз, під прямим кутом до поверхні землі. На знімках видно плоску картину (ортогональна проекція), що нагадує зображення на географічних картах. При перспективній (оглядовій) зйомці камера спрямована під кутом до горизонту. Під час перспективної аерофотозйомки на знімках бачимо об'ємну картину (аксонометрична проекція) [3].

3 Облік тварин з повітря за допомогою БПЛА.

При істотному зниженні витрачених коштів на залучення пілотованої авіації стало рентабельним застосування безпілотних літальних апаратів для обліку тварин. Такий «повітряний облік» дає змогу точно визначити чисельність тварин у мисливському господарстві та виявити місця їх концентрації [2].

4 Дистанційний контроль стану нафтопроводів і газопроводів.

На сьогодні застосування безпілотних літальних апаратів є найефективнішим і економічно вигідним методом обстеження нафтопроводів і газопроводів. У режимі реального часу отримують якісні зображення, що дають змогу виявляти нафтові розливи, виявляти акти несанкціонованої діяльності (сміттєзвалища, врізки, проведення робіт в охоронних зонах тощо). Аерофотознімки, отримані з борту БПЛА, дають змогу аналізувати й оцінювати технічний стан трубопроводів і навколотрубного простору [3].



Рисунок 1.3 – Приклад фотознімку трубопроводу в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні для визначення фактів незаконного врізання [3]

5 Аеро- і космозйомка місцевості.

Застосовується як для безперервного одночасного контролю над забрудненням природного середовища (земної поверхні, водних акваторій і приземної атмосфери), так і для контролю технічного стану об'єктів на всьому протязі тисячокілометрових водних і наземних нафтових і газових трас. Крім того, дані дистанційного моніторингу дають змогу оперативно виявляти й точно визначати координати зон небезпечного прояву стихійних природних процесів, що можуть призвести до аварій [2].

6 Аерофотозйомка та геодезія.

Надає матеріали аерофотозйомки, які можуть бути застосовані в таких сферах діяльності:

- ведення державного кадастру нерухомості та контроль містобудівної діяльності в населених пунктах;
- реагування на надзвичайні ситуації;
- контроль снігового та льодового покриву, кромки льодоставу, прогноз стоків річок та моніторинг місць розливів річок;

- оновлення топографічних карт;
- моніторинг різних типів об'єктів;
- моніторинг стану сільськогосподарських угідь, у тому числі цільового використання земель, оперативна оцінка стану та ступеня деградації земель, прогноз урожайності;
- створення географічних інформаційних систем.

7 Моніторинг лісових ресурсів.

Включає оцінку ступеня вирубки лісового масиву, визначення порід дерев, запобігання виникненню лісових пожеж, оцінку шкоди лісовим ресурсам після пожеж чи природних катаклізмів, виявлення несанкціонованих сміттєзвалищ, із визначенням осіб і номерів машин порушників. Дрони з інфрачервоними датчиками застосовують для виявлення лісових пожеж на ранній стадії [2].



Рисунок 1.4 – Моніторинг ділянки незаконної вирубки лісу

8 Безпілотні прикордонники.

Такі БПЛА спостерігають за кордоном за допомогою інфрачервоних і звичайних відеокамер з висоти до 6 км з оглядом у 50 км. Зображення з

відеокамери виходить настільки деталізованим, що з висоти видно, що знаходиться за плечима у порушників [2].



Рисунок 1.5 – Моніторинг динамічного об’єкту – група людей, яка імітує рух на відкритій ділянці місцевості

9 БПЛА для доставки вантажів клієнтам.

Система доставки за допомогою безпілотників вже запущені в світі. Їх застосовують онлайн-магазини та поштові служби. Ці безпілотники здатні перевозити вантажі вагою до 1 кг на відстань, що перевищує 10 км, без підзарядки батареї. Також зараз існують проекти з цілодобової доставки медикаментів, а також з повернення товару, який не підійшов [2].

10 Допомога в екстрених ситуаціях.

Дрони для пошуку зниклих дітей – як і собаки, можуть відстежувати запах дитини. БПЛА з термодатчиками використовуються для пошуку людей, завалених лавиною [2].

11 Пляжний рятувальник.

Дрон може бути аналогом рятувальника, який сидить на вищі. В Австралії місцева служба успішно протестувала мультикоптер,

налаштований на спостереження за прибережною зоною. Апарат не тільки може попередити плавців про наближення акул – у разі потреби він здатний кинути рятувальний круг потопаючому [2].

12 БПЛА для пожежогасіння.

Швидке виявлення і локалізація вогнищ загоряння – найважливіше завдання екстрених служб. Безпілотна авіація успішно застосовується пожежниками і рятувальниками в усьому світі для виконання цих задач.

- Оперативний пошук і локалізація вогнищ загоряння за допомогою тепловізора;
- Контроль обстановки та координація дій пожежної команди;
- Планування безпечних маршрутів для переміщення пожежних і рятувальних розрахунків;
- Пошук і порятунок, координація дій, спрямованих на допомогу постраждалим;
- Патрулювання лісів з метою профілактики виникнення пожеж і подальшого поширення вогню, якщо пожежа вже почалася [4].

Проаналізувавши все вище викладене, можна зробити висновок, що вже в дуже недалекому майбутньому безпілотна авіація посяде перше і головне місце порівняно з пілотованою.

Це можна пояснити тим, що під час використання безпілотників не потрібні людські ресурси, а отже, ніхто не наражає своє життя на небезпеку, а також тим, що в безпілотників дуже широкий спектр застосування в оборонній промисловості, у сфері гарантування безпеки, у сфері охорони здоров'я, розваг та в багатьох інших [2].

Не дивлячись на високий попит БПЛА у різних сферах, особливе місце вони займають у виявленні стихійних явищ, зокрема пожеж. Упродовж 2020 р. виникла низка великих лісових пожеж на Поліссі та Сході України, які завдали катастрофічних екологічних, соціальних та економічних збитків. Пожежонебезпечний період 2020 р. навіть за попереднім оцінюванням є найтяжчим за всю історію незалежної України. Такі прояви зміни клімату, як

тривала відсутність опадів, їхній просторовий і часовий перерозподіл, підвищення середніх температур повітря, неминуче призведуть до підвищення рівнів пожежної небезпеки в лісах України [4].

Запобігання пожеж важко вирішувати класичними методами, легше вирішувати за допомогою БПЛА, саме тому зараз дуже активно розвивається гілка з спеціалізованими дронами, які використовують спецслужби.

1.2 Класифікація БПЛА

Основними характеристиками, за якими відбувається розподіл БПЛА на різні класи, є дальність польоту, радіус дії, вантажопідйомність, злітна маса тощо. Однак, найбільшого поширення в класифікації БПЛА набула така характеристика, як злітна маса, яка дає змогу більш точно та наочно розділити БПЛА на класи [5].

За своїми геометричними розмірами БПЛА можуть бути розміром у кілька сантиметрів і виконувати невеликі місії, а можуть досягати довжини кількох десятків метрів і володіти високою міцністю та функціональними можливостями, такими як велика висота підйому і великий час польоту виконання завдання в автономному режимі [6].

Залежно від аеродинамічного принципу польоту вони класифікуються як БПЛА з жорстким крилом і роторні БПЛА.

БПЛА з жорстким крилом (рис. 1.6) мають заздалегідь визначений профіль крила, що дає змогу виконувати політ за рахунок підйомної сили, спричиненої поздовжньою швидкістю польоту. Керування БПЛА здійснюється за допомогою поверхонь, розташованих на крилі та фюзеляжі (елерони, кермо висоти і кермо напрямку), які дають змогу БПЛА здійснювати маневрування за кутами крену, тангажу і рискання [5].



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд БПЛА з жорстким крилом

БПЛА з жорстким крилом широко використовуються в таких завданнях, як зовнішнє спостереження під час довгих і далеких польотів, наприклад, під час моніторингу лісів або полів, автомобільних або залізних доріг тощо. Вони мають простішу конструкцію, менш складне технічне обслуговування, ефективну аеродинаміку, більші тривалість і дальність польоту, можуть літати з вищою швидкістю і меншою витратою палива [6].

Очевидно, що основний недолік таких апаратів – це їхня нездатність зависати в повітрі над однією ділянкою робочої місцевості, що виключає можливість проведення будь-яких загальних робіт з аерофотозйомки. Це також значно ускладнює їх запуск і посадку, оскільки залежно від їхнього розміру може знадобитися злітно-посадкова смуга або катапультна пускова установка, щоб підняти їх у повітря, і парашут або сітка для їх безпечного приземлення. Тільки малогабаритні БПЛА придатні для ручного запуску і посадки на непідготовлену територію [1].

Мультироторні (вертолітні) системи БПЛА є літаючою платформою з кількома (більше двох) несучими гвинтами (рис. 1.7). Аеродинаміка лопатей гвинта аналогічна аеродинаміці лопатей гвинтів БПЛА з жорстким крилом,

однак для зльоту мультироторного БПЛА не потрібен розгін з використанням злітної смуги або пускової установки.



Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд мультикоптера

Підйомна сила створюється лопатями, які постійно обертаються. Керування мультироторними БПЛА здійснюється шляхом зміни тяги і обертального моменту гвинтів [6].

Мультироторні БПЛА залежно від конфігурації гвинтів підрозділяються на трикоптери, квадрокоптери, гексакоптери і октокоптери. З погляду надійності наявність більшої кількості гвинтів гарантує ефективнішу роботу БПЛА, так квадрокоптери, які мають 4 гвинти, не зможуть здійснити посадку в разі відмови одного двигуна, в той час як гексакоптери зможуть приземлитися і мало того здійснювати подальший політ, але при обмеженому значенні кута ризику, при цьому октокоптер може повноцінно літати і приземлятися при відмові одного двигуна [6].

Мультироторні БПЛА забезпечують більш високу вантажопідйомність, легший зліт і посадку, кращу маневреність, ніж БПЛА з жорстким крилом, а також мають можливість зависати.

Однак БПЛА з жорстким крилом мають простішу конструкцію, менш складне технічне обслуговування, ефективну аеродинаміку та більшу дальність польоту. Час польоту мультироторних БПЛА з електродвигунами

майже ніколи не перевищує 30 хвилин, у той час як у БПЛА з жорстким крилом досягає 60 хвилин. Вантажопідйомність понад 3 кг характерна для БПЛА роторного типу. Однак таку вантажопідйомність важче досягти у БПЛА з жорстким крилом [6].

Мультироторні БПЛА використовують у таких галузях, як інспектування інфраструктури (мости, греблі), моніторинг невеликих полів і їхнє обприскування [4].

Основні класифікаційні ознаки.

1 Призначення:

- багатоцільові;
- цільові (розвідувальні, спостережні, транспортні).

2 Кратність застосування:

- багаторазові;
- одноразові.

3 Спосіб старту БПЛА:

- аеродромний старт;
- безаеродромний старт (старт із рампи, платформи, пускового

пристрою носія).

4 Спосіб повернення:

- з посадкою на аеродром базування за допомогою шасі;
- вільний спуск на парашуті в заданому районі;
- падіння на уловлювач;
- повернення на парашуті.

5 Область застосування:

- ближньої дії – до 25 км;
- малої дальності – до 100 км;
- середньої дальності – до 500 км;
- великої дальності – понад 500 км.

6 Злітна маса БПЛА:

- до 5 кг (клас мікро);

- до 25 кг (малий клас);
- 25-150 кг (легкий клас);
- 150-750 кг (середній клас);
- 750 - 15000 кг (важкий клас).

7. Тип БПЛА:

- літакової схеми;
- вертолітної схеми;
- ракетного забросу;
- з підйомним гвинтами.

Нижче наведено таблицю 1.1, у якій відображено міжнародну класифікацію БПЛА.

Таблиця 1.1 – Класифікація БПЛА

Клас	Найменування/ Міжнародне позначення	Злітна вага, кг	Радіус дії, км	Практична стеля, м
Малі	Нано/η	< 0,025	< 1	100
	Мікро/μ	< 5	< 10	3000
	Міні/mini	< 25	10-40	3000
Легкі	Ближньої дії класу 1	25-50	25-70	3000
	Ближньої дії класу 2	50-150	50-100	3000
Середні	Малої дальності /SR	≤ 200	≤ 150	4000
	Середню дальність /MR	≤ 500	200	5000
	Середню дальність з великою тривалістю польоту / MRE	500	500	8000
	Маловисотний великий дальності / LADP	≥ 250	>250	≤ 4000

Продовження таблиці 1.1

Клас	Найменування/ Міжнародне позначення	Злітна вага, кг	Радіус дії, км	Практична стеля, м
Важкі	Маловисотний великою тривалістю польоту / LALE	≥ 250	≥ 250	4000
	Середньовисотний великий тривалістю польоту/ MALE	≥ 1000	> 1000	8000
	Висотний великою тривалістю польоту / HALE	≥ 2500	> 4000	20000



Рисунок 1.8 – Приклади БПЛА, що належать до категорій Мікро та Міні

Також загально визнаною в авіації є система класифікації поділу БПЛА на класи. Виділяють класи БПЛА.

Клас 1. БПЛА літакового типу злітною масою до 10 кг з електричним двигуном. Вони можуть бути використані як засіб оперативного спостереження у складі стаціонарних постів охорони або мобільних груп. [5]

Клас 2. БПЛА літакового типу злітною масою до 100 кг з двигуном внутрішнього згорання. Вони можуть бути використані як засіб оперативного спостереження [5].

Клас 3. БПЛА літакового типу злітною масою до 1000 кг можуть

залучатися як для хімічної обробки великих площ, так і для оперативного транспортування вантажів [5].

Клас 4. БПЛА вертолітного типу. Вони становлять інтерес для моніторингу об'єктів.

Для БПЛА особливо важлива така характеристика, як корисне навантаження. Для виконання завдань дистанційного зондування і визначення координат досліджуваних ділянок місцевості корисне навантаження БПЛА має включати таке обладнання:

- пристрої отримання видової інформації;
- супутникову навігаційну систему (GPS);
- пристрої радіолінії видової та телеметричної інформації;
- пристрої командно-навігаційної радіолінії з антенно-фідерним пристроєм;
- пристрій обміну командною інформацією;
- пристрій інформаційного обміну;
- бортову цифрову обчислювальну машину;
- пристрій зберігання видової інформації [6].

Класифікація БПЛА допомагає зрозуміти їх основні характеристики та можливості. Відповідно до класифікації можна обрати потрібний БПЛА для конкретного завдання та оцінити ризики та обмеження при його застосуванні. Наприклад, малі та середні БПЛА можуть бути корисними для моніторингу стану довкілля та землеробства, а великі важкі БПЛА можуть бути корисними для розвідки військових цілей або для доставки вантажів на великі відстані.

1.3 Застосування квадрокоптерів для профілактики та гасіння пожеж

Наразі застосування квадрокоптерів для профілактики та гасіння пожеж не дуже популярно через низку причин, але дуже ефективне.

Основні можливості квадрокоптерів у цій сфері полягають у їх

здатності швидко та точно моніторити пожежу з повітря, дозволяючи оперативно реагувати на зміни у розмірі та місцезнаходженні пожежі. Крім того, квадрокоптери можуть використовуватися для транспортування обладнання та засобів гасіння на важкодоступні ділянки землі, а також для пошуку втрачених чи заблокованих людей.

Під час виникнення пожежі, ключовим моментом гасіння є вибір вирішального напрямку гасіння пожежі. Для прийняття такого рішення необхідно мати якомога більше інформації про пожежу та об'єкт пожежі. Але у зв'язку з великими площами об'єктів, складністю та розміщенням, людині, яка приїхала на пожежу, складно оцінити масштаби події та прийняти якнайшвидше правильне рішення [4].

Наразі головним завданням квадрокоптерів на пожежі є розвідка з повітря. Після прибуття на пожежу, фахівець у найкоротші терміни запускає квадрокоптер і починає збирати інформацію про пожежу, а саме:

- знаходження постраждалих на території об'єкта пожежі;
- місця знаходження людей, яким загрожує небезпека від вогню і вторинних факторів;
- визначення осередків загоряння;
- загроза поширення пожежі на інші будівлі та споруди;
- зручні місця підходу і під'їзду до місць горіння та евакуації.

Існують завдання пожежно-рятувальних служб, які без квадрокоптера складно виконати. До них належать:

- розвідка важкодоступної території під час надзвичайних ситуацій;
- здійснення пошуку і виявлення туристів, які загубилися в гірничо-лісистій місцевості;
- використання квадрокоптерів як ретрансляторів зв'язку на пожежах із великою площею;
- у разі встановлення спеціальних освітлювальних приладів на квадрокоптер, здійснювати освітлення місця роботи пожежних підрозділів;
- моніторинг річок, озер і прибережних морських вод на предмет

знаходження потопаючих і суден, що зазнають лиха.

Додатково можливе застосування квадрокоптерів для доставки невеликих вантажів у важко доступні місця під час надзвичайних ситуацій. Прикладом такого застосування квадрокоптера було на пожежі нафтопереробного заводу. Квадрокоптер був застосований для доставки засобів зв'язку пожежникам відсіченим вогнем, у яких вже розрядилися акумулятори на переносних радіостанціях [4].

Основне перспективне використання БПЛА в пожежогасінні – це лісові пожежі. Моніторинг лісів і торф'яних загорянь за допомогою авіації використовується винятково через високу вартість. До гасіння загорянь іноді залучають пожежну авіацію, але сам по собі захід дуже небезпечний: дим, що здіймається від загоряння, дезорієнтує пілота, до того ж апарат повинен максимально наблизитися до вогню для скидання речовини [4].

Переваги використання безпілотників у гасінні лісових пожеж:

- порівняно дешевший моніторинг території;
- точне визначення координат вогнища;
- зниження ризику людських втрат серед пожежників;
- можливість оперативної ліквідації вогню.

Враховуючи це, застосування квадрокоптерів може стати цінним доповненням до існуючих методів профілактики та гасіння пожеж.

У майбутній перспективі, квадрокоптером буде забезпечено кожен пожежно-рятувальний підрозділ, що допоможе врятувати більше людей і зберегти життя пожежників від зайвого ризику.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ БПЛА

2.1 Математична модель БПЛА

Розуміння математичної моделі керування БПЛА є важливим для ефективного та безпечного функціонування. Математична модель керування описує поведінку БПЛА у різних умовах та виконання завдань в різних режимах роботи. Розуміння цієї моделі дозволяє інженерам створювати більш точні та ефективні алгоритми керування, що допомагають БПЛА виконувати завдання більш точно та швидко.

Також, знання математичної моделі керування БПЛА є важливим для розробки нових технологій керування, таких як інтелектуальні алгоритми, що дозволяють БПЛА працювати у режимі автономного керування та забезпечувати високу точність та швидкість виконання завдань. Розглянемо математичну модель руху БПЛА.

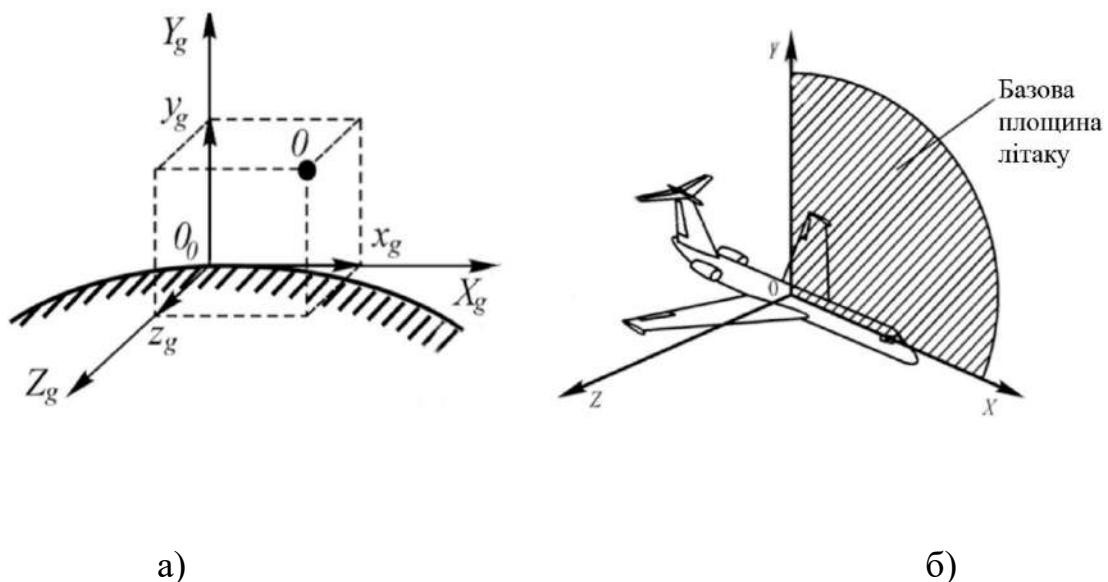


Рисунок 2.1 – Земна та зв'язана системи координат

Керування об'єктом здійснюється у відносній земній системі координат (рисунок 2.1, а), тобто відлік ведеться відносно деякої обраної точки (наприклад, точки зльоту). Однак інерціальні датчики, які жорстко пов'язані з конструкцією літального апарата, перебувають у зв'язаній системі координат (рисунок 2.1, б) [7].

Для переходу з відносної земної у зв'язану і навпаки використовується матриця поворотів R , яка має вигляд [7]:

$$R = \begin{bmatrix} C_\varphi C_\psi - S_\varphi C_\theta S_\psi & -C_\varphi S_\psi - S_\varphi C_\theta C_\psi & S_\varphi S_\theta \\ S_\varphi S_\psi + C_\varphi C_\theta S_\psi & -S_\varphi S_\psi + C_\varphi C_\theta C_\psi & -C_\varphi S_\theta \\ -S_\theta S_\psi & S_\theta C_\psi & C_\theta \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

де $C_x = \cos(x)$ та $S_x = \sin(x)$, φ – крен, θ – тангаж, ψ – ристання.

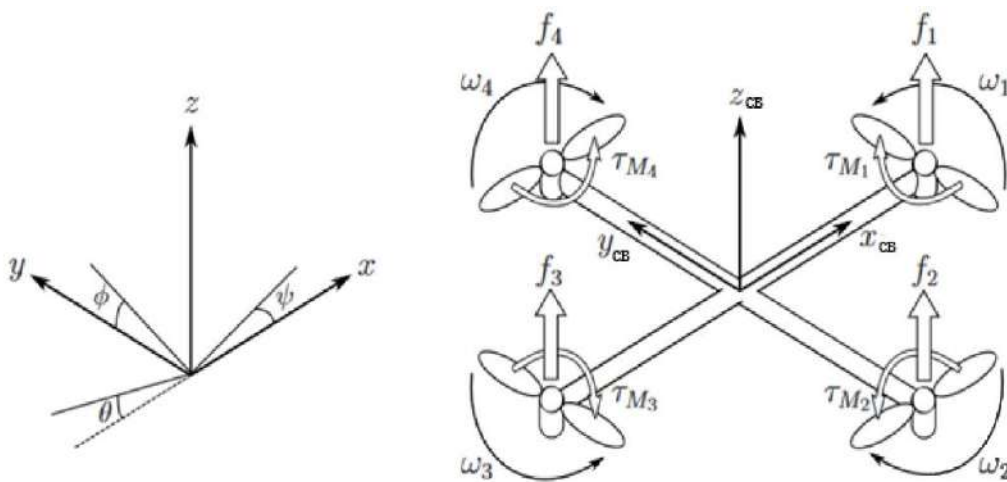


Рисунок 2.2 – Земна та зв'язана системи координат для чотирироторного літального апарата

У загальному випадку чотирироторний літальний апарат має симетричну схему побудови, тому матриця інерції має діагональний вигляд:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Кожен ротор i , обертаючись із кутовою швидкістю ω_i , створює силу тяги f_i ; кутова швидкість і прискорення ротора створюють також момент навколо осі обертання τ_{M_i} [7]:

$$f_i = k\omega_i^2 \quad (2.3)$$

$$\tau_{M_i} = b\omega_i^2 + I_M \dot{\omega}_i \quad (2.4)$$

де k – постійна тяги, b – постійна кроку повітряного гвинта, I_M – момент інерції ротора.

Сума сил тяги всіх роторів створює тягу T у напрямку осі z мультіротора:

$$T = \sum_{i=1}^4 f_i = k \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \quad (2.5)$$

Кутові моменти, створювані роторами в напрямку відповідних кутів у зв'язаній системі координат:

$$\tau_{zg} = \begin{bmatrix} Lk(\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ Lk(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Отримана модель дуже спрощена і не враховує всіх аеродинамічних ефектів, що впливають на літальний апарат у процесі його польоту, проте така модель вже дає змогу перейти до виведення рівнянь динаміки [7].

У відносній земній системі координат динаміку мультіроторної

літальної платформи можна описати як:

$$m\ddot{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + RT_{3\theta} \quad (2.7)$$

Вирази для кутових переміщень зручніше розглядати у зв'язаній системі координат. Для цього використовується рівняння Ейлера [7]:

$$\dot{\omega} = I^{-1}(\tau - \omega \times (I\omega)) \quad (2.8)$$

де ω – вектор кутових швидкостей, I – матриця інерції літального апарата.

Знаючи матрицю інерції отримуємо:

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} \tau_{\phi} I_{xx}^{-1} \\ \tau_{\phi} I_{yy}^{-1} \\ \tau_{\phi} I_{zz}^{-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \omega_x \omega_z \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Зв'язок між похідною кутової орієнтації літального апарата у відносній земній системі координат і кутовими швидкостями у зв'язаній системі координат можна представити як:

$$\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\theta\sin\varphi \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (2.10)$$

Нехай x_1 – вектор позиції літального апарата, x_2 – вектор швидкостей, x_3 – вектор кутової орієнтації (крен, тангаж і ристання), x_4 – вектор кутових швидкостей, тоді модель системи в просторі станів має вигляд [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} + \frac{1}{m} RT_{3\theta} \\ \dot{x}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \theta \sin \varphi \end{bmatrix}^{-1} x_4 \\ \dot{x}_4 = \begin{bmatrix} \tau_\phi I_{xx}^{-1} \\ \tau_\phi I_{yy}^{-1} \\ \tau_\phi I_{zz}^{-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \omega_x \omega_z \\ \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Вхідні впливи задаються в системі опосередковано через $T_{c\theta}$ і τ . Без будь-якої стабілізації система є нестійкою. Результат моделювання – процес, який розходиться [7].

Математична модель БПЛА є важливим інструментом в дослідженні та проектуванні безпілотних літальних апаратів. Вона дозволяє розглядати БПЛА як об'єкт управління та досліджувати його поведінку в різних умовах та при різних параметрах.

2.2 Методи управління БПЛА

Методи управління БПЛА включають різні техніки та алгоритми, які забезпечують стабільність та точність керування, зменшують ризик втрати

зв'язку з БПЛА та забезпечують безпеку польоту.

Прийнято виокремлювати три режими управління різнорідними робототехнічними комплексами (РТК) [8]:

- ручний (пілотажний, виконавчий);
- напіваавтоматичний (навігаційний, тактичний);
- автоматичний (диспетчерський, супервізорний, стратегічний).

Функції, що відповідають режимам автоматичного і напіваавтоматичного управління БПЛА:

- коригування зовнішніх умов реалізації завдання (наприклад, зазначення зон заборони польотів, зміна параметрів районів і об'єктів моніторингу) [8];

- визначення (перевизначення) цілей і розподіл (перерозподіл) завдань між елементами РТК (наприклад, польотних завдань і об'єктів стеження) [8];

- зміна порядку автоматичного застосування елементів РТК або цільових значень одиничних параметрів (наприклад, частота аерофотозйомки і курс руху) [8].

За викликом оператора в окремих вільно переміщуваних вікнах у пульті керування пред'являються модулі напіваавтоматичного рівня управління, доступу до ручного управління, пред'явлення телеметричної інформації тощо [8].

Як показує практика розроблення безпілотних літальних апаратів, у контексті керування БПЛА існують два основні елементи. Перший – виконавчий, тобто це сам планер із силовою установкою і рульові механізми. Другий – командний. Це той елемент, який ставить завдання на політ, ухвалює рішення в разі необхідності змінити програму польоту, виконує корекцію руху літального апарата в разі його відхилень від заданої траєкторії руху [9].

Під час побудови комплексу управління БПЛА командний елемент або його частина вносився за межі апарата і зв'язується з виконавчим елементом лінією передачі.

Система керування (СК) повинна вирішувати такі завдання:

- стабілізація параметрів руху об'єкта стосовно зовнішніх перешкод різної природи;
- аналіз зовнішніх даних бортовими засобами і визначення пріоритетної мети залежно від поставленого перед БПЛА завдання;
- розрахунок оптимальної траєкторії руху з метою зменшення часу руху і витрати ресурсів БПЛА;
- контроль правильності утримання траєкторії;
- забезпечення відмовостійкості об'єкта управління або компенсація змін його характеристик бортовими засобами;
- виконання обчислювальних операцій великого обсягу в реальному масштабі часу для реалізації алгоритмів керування БПЛА [9].

Слід підкреслити, що основною функцією, яку розв'язує СК, є керування рухом центру мас (три канали керування) і кутовими рухами БПЛА щодо центру мас (три канали керування). Таким чином, управління польотом БПЛА зводиться до управління параметрами його руху: кутовими координатами, кутовими швидкостями і прискореннями, лінійними координатами (дальністю, висотою, бічним переміщенням) тощо [10].

Визначення власних координат повітряним судном відбувається щомиті за стандартної роботи приймача супутникової навігаційної системи (СНС). Під час переналаштування приймача частота визначення власних координат може бути збільшена. Характер руху протягом однієї секунди змінюється мало, і положення БПЛА можна досить точно розрахувати за його попереднім положенням, динамікою польоту і поточним маневром. [1].



Рисунок 2.3 – Приклад наземного пункту керування

Розглянемо розташування командного елемента на пункті управління. Одним із методів керування БПЛА є пілотажний.

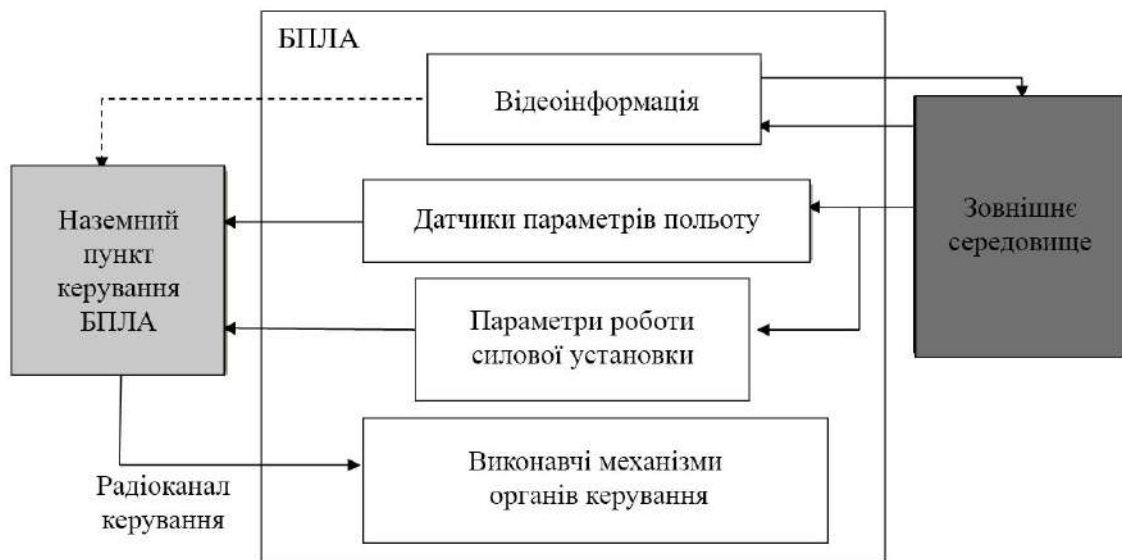


Рисунок 2.4 – Структура пілотажного методу керування БПЛА

У цьому випадку управління виконується безпосередньо виконавчими механізмами планера. З пункту управління передаються задані кути відхилення рульових аеродинамічних площин і режими роботи силової установки. Для БПЛА з високошвидкісними характеристиками і високою

маневреністю потрібне дуже швидке доставлення команд управління з пункту керування на борт. Одночасно з цим пілотажне управління вимагає високого ступеня втручання оператора в процес управління літальним апаратом, що, своєю чергою, вимагає високої концентрації оператора, а також високого ступеня підготовки [11].

Крім пілотажного методу керування БПЛА є метод, який називається навігаційним.

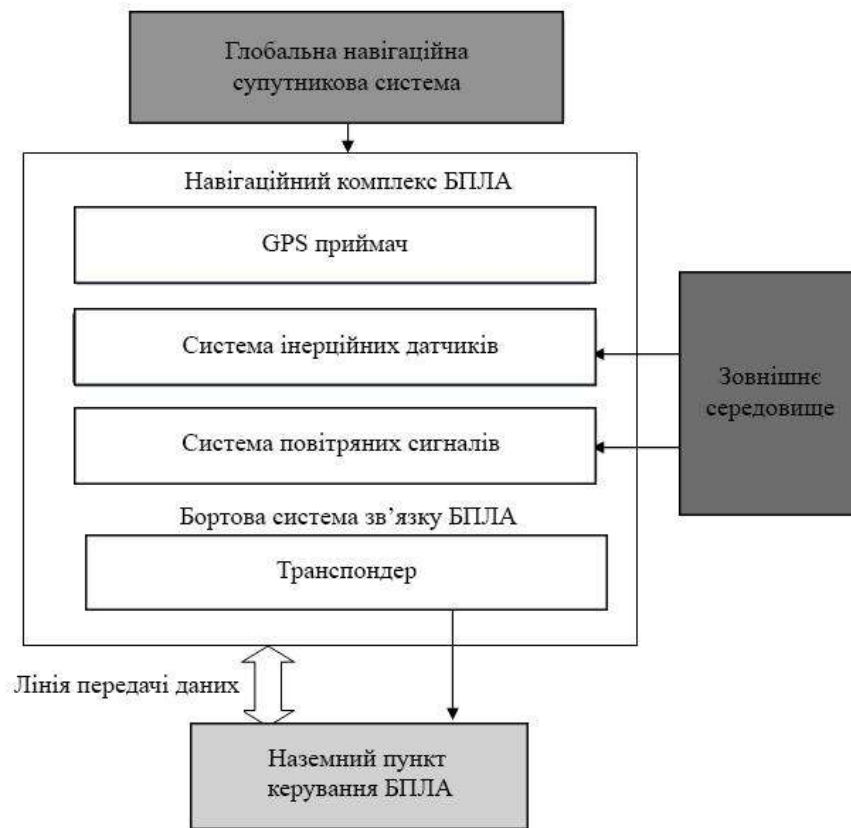


Рисунок 2.5 – Структура навігаційного методу керування БПЛА

Керування БПЛА здійснюється не передачею йому команд для виконання маневрів, а шляхом завдання точок маршруту щодо земної поверхні. Цей спосіб керування вимагає перенесення частини обчислень із пункту керування на борт БПЛА [8].

Усі обчислення з виявлення відхилень у русі від заданої траєкторії виконуються вже на борту. Відповідно, ще більше знімається навантаження з радіолінії. По ній передаються тільки зміни навігаційної програми (зміна маршруту руху щодо раніше запланованого). У цьому разі в разі виникнення будь-яких відхилень від заданої траєкторії навігаційний обчислювач здатний сам, без участі зовнішнього пункту управління, виробити набір команд для корекції руху. Однак таке керування підвищує вимоги до апаратури навігаційного обчислювача (до пам'яті, продуктивності та програмного забезпечення) [12].

У такому разі до складу бортового комплексу навігації та керування мають входити:

- приймач супутникової навігації, що забезпечує приймання навігаційної інформації від систем GPS;
- система інерціальних датчиків, що забезпечує визначення орієнтації та параметрів руху БПЛА;
- система повітряних сигналів, що забезпечує вимірювання висоти і повітряної швидкості;
- апаратура лінії передачі даних, різні види антен, призначені для виконання завдань.

Бортова система навігації та управління забезпечує:

- політ за заданим маршрутом (завдання маршруту проводиться із зазначенням координат і висоти поворотних пунктів маршруту);
- зміну маршрутного завдання або повернення в точку старту за командою з наземного пункту управління;
- обліт зазначеної точки;
- автосупровід обраного об'єкта;
- стабілізацію кутів орієнтації БПЛА;
- підтримання заданих висот і швидкості польоту (шляхової або повітряної);
- збір і передачу телеметричної інформації про параметри польоту і

роботу цільового обладнання;

- програмне управління пристроями цільового обладнання [8].

Бортова система зв'язку:

- функціонує в дозволеному діапазоні радіочастот;
- забезпечує передавання даних з борту на землю і з землі на борт.

Дані, що передаються з борту на землю:

- параметри телеметрії;
- потокове відео- і фотозображення [8].

Дані, що передаються на борт, містять:

- команди керування БПЛА;
- команди керування цільовою апаратурою [8].

Третій метод управління БПЛА називається автоматичний.

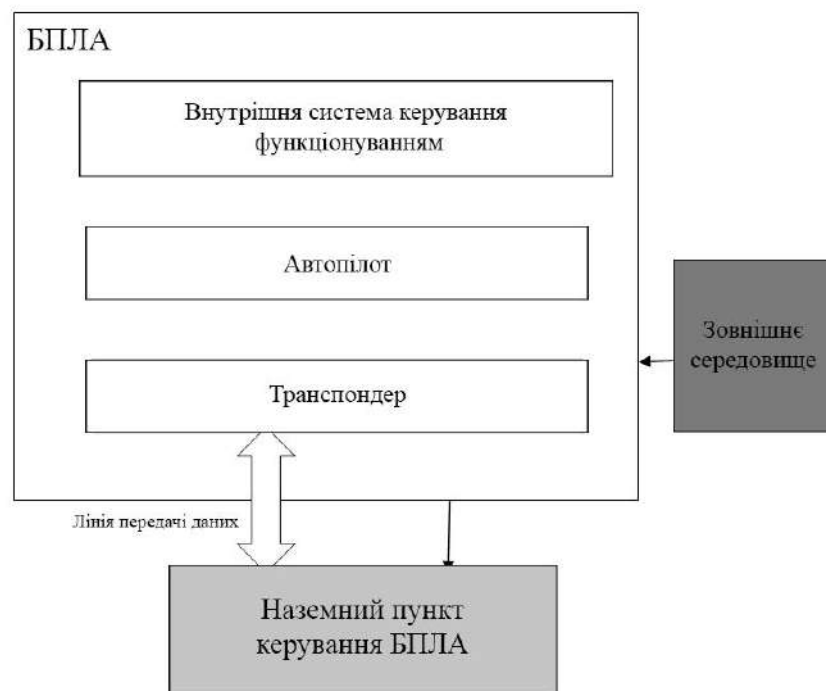


Рисунок 2.6 – Структура автоматичного методу керування БПЛА

Для його використання має бути створена внутрішня система управління функціонуванням БПЛА. Вона призначена для реалізації алгоритмів функціонування внутрішніх систем і пристроїв літального

апарата для досягнення мети завдання і фактично реалізує локальні функції управління в повітряному просторі [1].

Цей метод є найбільш ефективним та надійним, оскільки він забезпечує високу точність та швидкість реакції, а також може працювати в автономному режимі. Автоматичний метод керування є найбільш популярним та широко використовується в безпілотних літальних апаратах.

Отже, всі три методи керування БПЛА є важливими та використовуються в сучасних системах керування безпіотною авіацією.

2.3 Місце GPS позиціонування в інтелектуальних методах управління

У структурі системи управління, система навігації є основою функціонування системи автоматичного управління і використовується для оцінки стану БПЛА та налаштування автопілота на конкретні режими польоту.

До навігаційної системи БПЛА мають входити такі основні складові:

- Інерціальний модуль: Інерційні вимірювачі, такі як гіроскопи та акселерометри, вимірюють зміни в прискоренні та кутовій швидкості БПЛА. Ці вимірювачі допомагають визначити зміни в положенні БПЛА та його орієнтації [1].

- Компаси: Компаси допомагають визначити орієнтацію БПЛА відносно магнітного поля Землі. Це важливо для визначення напрямку польоту та корекції навігаційних даних [1].

- GPS-приймачі: GPS (Global Positioning System) – це глобальна система позиціонування, яка дозволяє визначати місцеположення та швидкість БПЛА за допомогою сигналів від супутників. GPS-приймачі є основним компонентом навігаційної системи БПЛА [1].

GPS є одним з найбільш важливих елементів управління БПЛА, оскільки він дозволяє визначати точну позицію БПЛА в режимі реального часу. GPS використовується для автономного навігаційного контролю,

пілотажу та керування польотом, що дозволяє БПЛА підтримувати стабільну траєкторію польоту [13].

GPS працює за принципом трилатерації. Це означає, що GPS отримує сигнали від трьох або більше супутників та використовує часову різницю між сигналами, щоб визначити місцезнаходження об'єкта. GPS-приймач на борту БПЛА отримує сигнали від супутників, які знаходяться у космосі на орбіті. Кожен супутник випромінює сигнал, який містить інформацію про місцезнаходження супутника та час випромінювання сигналу. GPS-приймач на борту БПЛА отримує ці сигнали та використовує часову різницю між сигналами для визначення свого місцезнаходження [13].

Для точного позиціонування БПЛА за допомогою GPS потрібно використовувати більше ніж чотири супутники. Це дозволяє отримати точну інформацію про місцезнаходження та швидкість БПЛА в реальному часі.

Враховуючи інформацію від GPS, БПЛА може автоматично виконувати задані маршрути, визначати потрібну висоту польоту, коригувати своє положення, щоб досягти заданих координат та виконувати інші завдання в автономному режимі. GPS також є важливим компонентом системи безпеки польоту, дозволяючи БПЛА повернутися до базової точки або виконати інші дії у разі виникнення непередбачуваних обставин [14].

У БПЛА найчастіше використовується формат запису GPS координат градусів та десяткових градусів (DD). В цьому форматі широта та довгота записуються як десяткові дробі зі знаком «+» для північної широти та східної довготи, та знаком «-» для південної широти та західної довготи [13].

З градусів, хвилин та секунд можна перевести у десяткові градуси. Для цього треба від кількості хвилин та секунд перейти до десяткового дроби, розділивши відповідну кількість хвилин на 60 та секунд на 3600. Потім отримані десяткові значення слід додати (або відняти, якщо це західна довгота) до відповідного значення градусів.

Наприклад, для координат міста Харкова $49^{\circ}59'36.6''$ N, $36^{\circ}13'49.4''$ E:

$$49 + \frac{59}{60} + \frac{36.6}{3600} = 49.9935 \text{ (широта)}$$

$$36 + \frac{13}{60} + \frac{49.4}{3600} = 36.2304 \text{ (довгота)}$$
(2.12)

Таким чином, координати міста Харкова у форматі десяткових градусів будуть 49.9935° N , 36.2304° E .

Ці координати вказують на те, що місто Харків знаходиться на 49 градусах, 59 хвилинах та 36 секундах північної широти та 36 градусах, 13 хвилинах та 49 секундах східної довготи.

Цей формат запису GPS координат зручний для використання у програмному забезпеченні та системах навігації, оскільки дозволяє легко виконувати математичні операції з координатами, а також конвертувати їх до інших форматів.

Окрім GPS, можуть використовуватись інші навігаційні системи для позиціонування БПЛА, такі як GLONASS, BeiDou та Galileo. Крім того, можуть використовуватись додаткові сенсори, такі як акселерометри, гіроскопи та барометри, для покращення точності визначення місцезнаходження та швидкості БПЛА [14].



Рисунок 2.7 – Порівняння орбіт різних навігаційних систем

Узагальнюючи, GPS є ключовою складовою навігаційної системи БПЛА. Він дозволяє БПЛА визначати своє місцезнаходження та швидкість в реальному часі, що є важливим для виконання різних завдань. Крім GPS, можуть використовуватись інші навігаційні системи та сенсори для покращення точності визначення місцезнаходження та швидкості БПЛА.

За допомогою GPS-даних БПЛА може автоматично керувати польотом, підтримуючи задану траєкторію та виконуючи інші завдання, наприклад, моніторинг або доставку вантажу.

GPS-позиціонування може бути використане як для автономного, так і для дистанційного керування БПЛА. Для автономного керування, GPS-дані можуть бути використані для визначення траєкторії та точки приземлення БПЛА. Для дистанційного керування, GPS-дані можуть бути використані для передачі реального часу позиції БПЛА та керування польотом здалеку [13].

В цілому, GPS-позиціонування є важливим елементом в методах управління БПЛА, що дозволяє забезпечити точне позиціонування та керування польотом, зменшуючи ризик виникнення непередбачуваних ситуацій під час польоту.

Без навігаційної системи БПЛА не зможе виконувати свої завдання в автономному режимі та безпечно повертатися до бази після завершення польоту.

2.4 Інтелектуальні польотні режими БПЛА

Інтелектуальні польотні режими БПЛА – це програмні алгоритми та функції, які дозволяють дронам виконувати різні завдання без прямого управління оператором. Вони можуть використовуватись для виконання різних завдань, таких як автоматичний пілотаж, навігація, виконання зйомок з повітря, виявлення та слідкування за об'єктами, аналіз отриманих зображень та даних, і т. д.

З розвитком квадрокоптерів розвивається їхній функціонал і продуктивність. Якщо перші моделі ледь оснащувалися камерами, то зараз для аерозйомки БПЛА оснащуються множинними допоміжними польотними режимами моніторингу та зйомки.

Польотні режими діляться на дві основні категорії:

- стандартні режими польоту;
- інтелектуальні польотні режими.

Стандартні режими польоту призначені для ведення зйомки з повітря. Ці режими дозволяють пілотувати дрон безпечно, ефективно та з меншим ризиком помилки, що робить їх корисними для пілотів з будь-яким рівнем досвіду. Це такі режими, як Beginner Mode, Positioning Mode, Attitude Mode та Sport Mode.

Наприклад, Beginner Mode – режим розроблений для новачків, які тільки починають використовувати БПЛА. У Beginner Mode функціональні можливості БПЛА можуть бути обмежені з метою забезпечення простоти управління та безпеки. Наприклад, БПЛА може мати обмежену максимальну висоту та дальність польоту. Цей режим допомагає новачкам отримати досвід безпечного та контрольованого польоту [16].

Positioning Mode (Режим позиціонування) – режим використовує GPS або інші супутникові системи для точного позиціонування БПЛА у просторі. У Positioning Mode БПЛА може автоматично утримувати задану позицію, використовуючи сигнали з супутників. Це дозволяє забезпечити стабільність польоту та точність місцезнаходження, що особливо корисно при зйомці відео або виконанні точних завдань [16].

У Attitude Mode (Режим орієнтації) БПЛА керується за допомогою гіроскопів та акселерометрів, а не GPS. Цей режим дозволяє користувачу контролювати орієнтацію апаратури, таку як кут крену, тангажу та курсу. Attitude Mode дає більшу свободу управління БПЛА, дозволяючи виконувати складніші маневри та керувати політними характеристиками [16].

Sport Mode призначений для швидкого польоту. В цьому режимі БПЛА

може рухатись з високою швидкістю та мати більшу маневреність. Sport Mode зазвичай вимагає більшого досвіду управління БПЛА, оскільки він дозволяє виконувати стрімкі повороти та маневри [16].

Розглянемо комплекс інтелектуальних режимів більш детально. На різних моделях БПЛА може дещо відрізнятися за кількістю доступних стилів пілотування. За допомогою інтелектуальних режимів дрон отримує можливість літати автономно, тобто працює в напіваавтоматичному режимі керування. Завдяки цьому можна зосередитися безпосередньо на моніторингу або аерозйомці [15].

Існує багато різних інтелектуальних режимів керування дроном, які можуть забезпечити автоматизоване керування та навігацію. Розглянемо деякі з них.

1 Кінематографічний режим (Cinematic Mode).

Поєднує в собі найкращі можливості двох стандартних режимів пілотування: режиму позиціонування (P-Mode) і режиму орієнтації (A-Mode). Він використовується для створення плавних кадрів з повітря. В кінематографічному режимі дрон сповільнює рух більш плавно і природно за рахунок своєї інерції, як у режимі орієнтації. Під час уповільнення руху літального апарату обертання також стає більш плавним [15].

2 Режим TapFly.

Дослівний переклад «Торкнися і лети». Одним дотиком на карті дисплея можна спрямувати дрон у політ, використовуючи мобільний пристрій (смартфон або планшет). Під час польоту дрон буде автоматично оминати перешкоди, оскільки ця система також працюватиме в автоматичному режимі. Висоту і швидкість польоту можна регулювати за допомогою елементів управління на екрані [15].

3 Режим Active Track.

Один з найпопулярніших і часто використовуваних інтелектуальних режимів польоту. Поєднуючи роботу модуля GPS і камер, дрон здатний відстежувати об'єкти, які цікавлять оператора, включно з людьми, тваринами

або транспортними засобами. Це також можуть бути нерухомі об'єкти. Дрон виконує це в автоматичному режимі після надходження команди. Режим відстеження насправді має три варіанти: Trace, Profile і Spotlight. Залежно від них генерується позиція безпілота щодо об'єкта відстеження [15].

4 QuickShot.

QuickShot Mode розроблений для швидкого і зручного створення фотографій і відеокліпів. У будь-якому з його чотирьох підрежимів вибрати об'єкт для створення кадру просто. Наприклад, натиснути на нього на дисплеї або намалювати навколо нього рамку [15].

Одним із найпопулярніших підрежимів QuickShot є Dronie, де дрон летить угору і назад, зберігаючи при цьому фокус на об'єкті. Режим ракети (Rocket Mode) функціонує аналогічно, за винятком того, що він летить прямо вгору, як ракета. У режим Helix безпілотник рухається вгору, обертаючись по умовній спіралі [15].

5 Режим Tripod.

Режим Tripod зручний для аерозйомки з близької відстані. У цьому режимі швидкість руху дрона знижується до приблизно 4-5 км/год. Спеціально налаштовані елементи керування допомагають оператору здійснювати дуже точні рухи і зберігати стабільне положення безпілота. Однак ефективна робота цього режиму дуже сильно залежить від наявності та якості сигналу GPS [15].

6 Режим Draw.

У цьому режимі вказується шлях, яким прямуватиме дрон, по намальованій схемі на екрані мобільного пристрою. Швидкість руху може контролюватися за допомогою повзунків меню на дисплеї.

7 Режим Waypoints.

Як і в режимі Draw, можна вказувати траєкторію польоту дрона в режимі Waypoints. Основна відмінність полягає в тому, що потрібно лише відзначити точки маршруту, які цікавлять. Безпілотник рухатиметься, орієнтуючись на них. Це корисно, якщо в цих точках дрону потрібно

виконати будь-яку роботу (відзняти матеріал, зокрема з використанням іншого режиму, провести інспекцію об'єкта або іншу промислову роботу).

Режим є ефективним, тому що дрон може в такому разі гнучко вибирати найбільш раціональний маршрут пересування від однієї точки до іншої (рис.2.8). Також підвищується точність польоту, оскільки точки встановлюються з використанням координат. Також ПЗ в дронах DJI дає змогу запам'ятати дані точки для повторення маршруту [15].

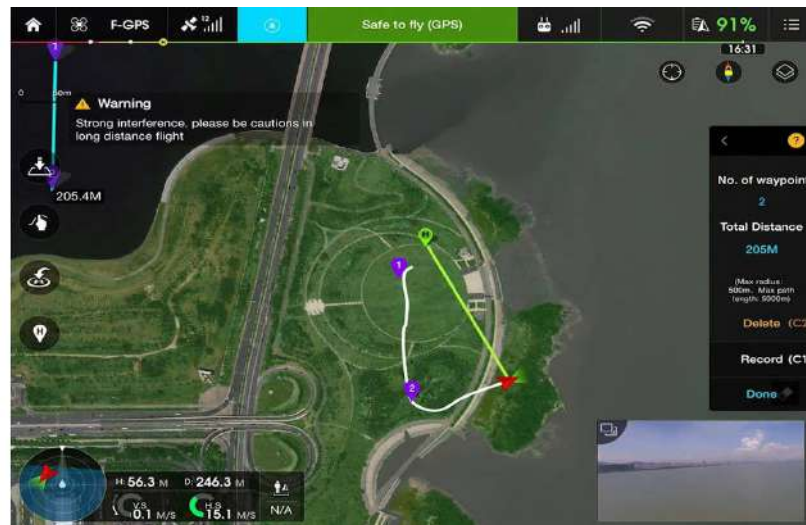


Рисунок 2.8 – Інтерфейс DJI у режимі Waypoints

8 Режим стеження за рельєфом (Terrain Follow Mode).

Режим Terrain Follow Mode доступний тільки в дронах DJI з оптичними сенсорами, які повернуті вниз. До них належать такі моделі, як Phantom 4 Pro і Mavic, а також низка промислових і сільськогосподарських безпілотників. У цьому режимі квадрокоптер може підтримувати постійну різницю висот від землі навіть під час підйому на гору з ухилом до 20 градусів. Перепад висот може бути встановлений від 1 до 10 метрів і не працюватиме, якщо дрон перетне місцевість вниз по схилу [15].

9 Spotlight Pro.

Режим Spotlight Pro є набагато складнішою та вдосконаленою версією підрежиму Spotlight ActiveTrack. Функція дає змогу апарату летіти в

автономному режимі, поки камера літального апарата продовжує відстежувати обраний об'єкт. У Spotlight Pro також можна використовувати підрежим Composition Mode, за допомогою якого є можливість окреслити область на екрані для початку відстеження об'єкта. Тобто, камера почне стежити за ним тільки тоді, коли він перетне запропоновані межі та увійде в окреслений район [15].

10 Фіксація курсу (Course Lock).

Фіксація (блокування) курсу дає змогу забезпечити політ дрона за конкретним напрямком. Тобто, літальний апарат буде обмежений у маневрах і зможе летіти тільки в рамках обраного «коридору» туди і назад (рис. 2.9). У цьому разі зберігається свобода керування підвісом і камерою, тому на якість зйомки ця функція не вплине. Вона корисна, якщо плануються певні польотні завдання вздовж маршруту, і відхилення від нього може завдати шкоди основній меті [15].

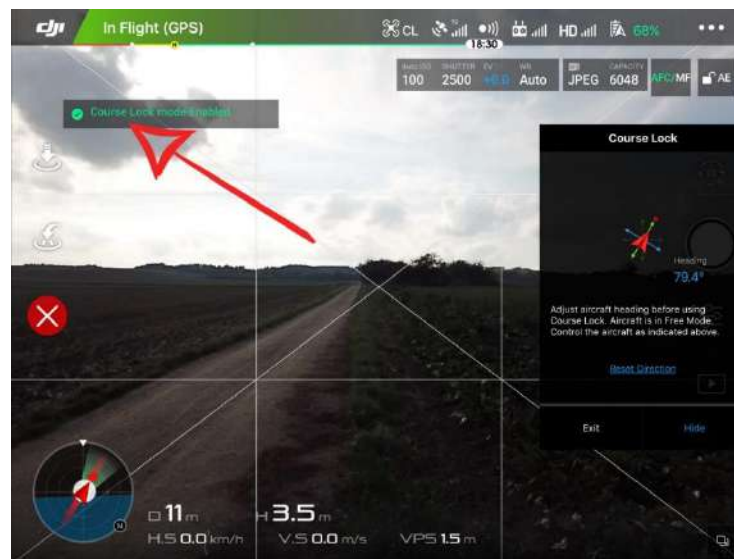


Рисунок 2.9 – Інтерфейс DJI у режимі Course Lock

12 Режим «Точки інтересу» / Points of Interest.

Режим Point of Interest (POI) багато в чому схожий на режим кругової швидкої зйомки. У його рамках дрон змушений рухатися по колу, а камера

буде сфокусована на обраному об'єкті. В рамках режиму ROI можна регулювати швидкість, висоту і радіус польоту. Рух за заданим шаблоном триватиме, поки пілот не втрутиться і не скасує режим. При цьому можна зупинити рух, але не зупиняти фокусування камери на об'єкті [15].

У багатьох інтелектуальних режимах дрон самостійно приймає рішення щодо керування, використовуючи вбудовані алгоритми та сенсори для навігації, збору даних та уникнення перешкод. Оператор може визначити певний маршрут чи регіон, в якому повинен рухатись дрон, і він самостійно пролітає цю траєкторію. Кожен інтелектуальний режим керування дроном має свої переваги та недоліки, які повинен враховувати оператор.

Застосування інтелектуальних польотних режимів дозволяє значно збільшити продуктивність та ефективність БПЛА, зменшити навантаження на пілота та знизити ризики пов'язані з людським фактором.

3 АНАЛІЗ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ БПЛА ДЛЯ ЗАДАЧ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ

3.1 Методи виявлення вогню на зображенні

Метод виявлення вогню на зображенні – це процес автоматичного аналізу зображень для виявлення областей, де можливо відбувається пожежа. Ці методи використовуються в різних галузях, включаючи пожежну безпеку, лісове господарство та ін.

Розглянемо стадії пожежі (рисунок 3.1):

- початкова фаза (поява диму);
- фаза зростання (поява полум'я);
- фаза повного зростання (стійке полум'я, яке поширюється, що супроводжується великими клубами диму сіро-чорного кольору);
- фаза загасання (зменшення об'ємів полум'я і диму);
- кінцева фаза (завершення пожежі) [17].

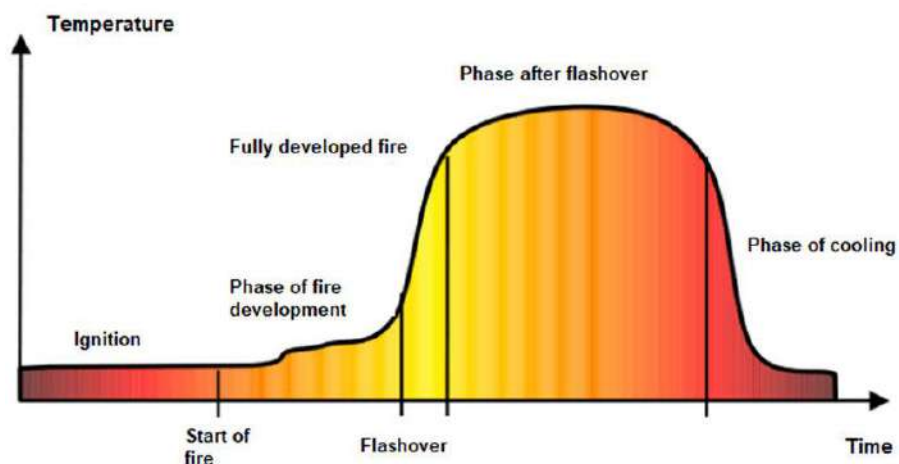


Рисунок 3.1 – Стадії пожежі

Дим і вогонь, як об'єкти дослідження мають наступні ознаки:

- дим і вогонь є динамічними текстурами;
- динамічні текстури мають просторові та часові (темпоральні) ознаки;
- доцільно проводити аналіз кадрів на наявність диму і вогню, спочатку використовуючи часові ознаки;
- дим за своєю природою є напівпрозорою структурою, яка динамічно змінює свою форму (посилюючись або послаблюючись);
- на початку пожежі дим має відтінки від білого до темно-сірого кольорів, тому зазвичай шукають динамічні текстури сірого кольору;
- додатковими ознаками слугують фрактальність і мерехтіння країв диму та полум'я, зумовлене фізичною природою початкової фази пожежі [17].

Існує кілька методів виявлення вогню на зображенні, серед яких:

- порогова обробка – метод заснований на використанні порогового значення, за якого всі пікселі з яскравістю, вищою за поріг, вважаються полум'ям [18];
- алгоритми машинного навчання – метод використовує навчену модель для визначення полум'я на зображенні. Модель навчається на наборі даних із розміткою зображень із вогнем і без вогню. Зазвичай використовуються нейронні мережі, такі як згорткові нейронні мережі (CNN) [18].
- аналіз кольору – метод заснований на використанні колірної інформації для визначення полум'я. Полум'я має характерний червоний, жовтий і помаранчевий колір, який може бути виявлений на зображенні. Однак, він також може бути ненадійним, оскільки колірна інформація може бути змінена іншими факторами [19].

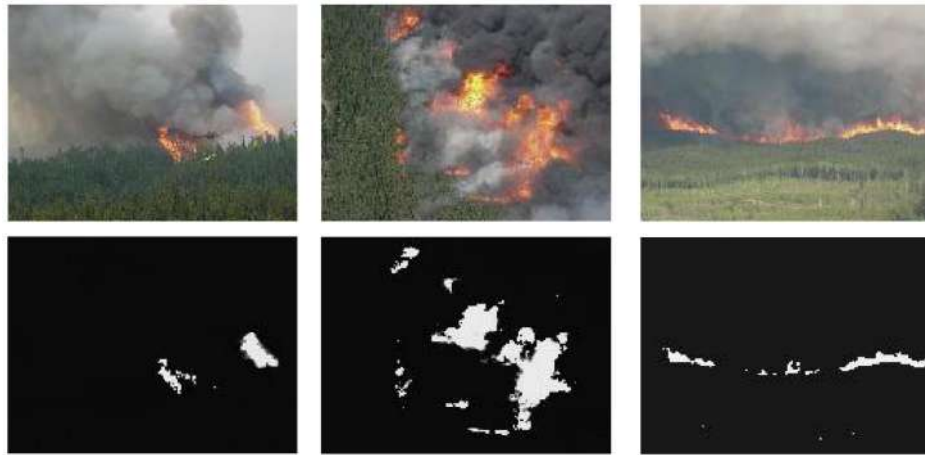


Рисунок 3.2 –Виявлення пожежі на основі колірної сегментації

- аналіз руху – метод заснований на виявленні руху в зображенні. Полум'я створює рух у навколишній області, який можна виявити за допомогою аналізу оптичного потоку. Однак, він може бути ненадійним у статичних ситуаціях [19].

Ці методи можуть використовуватись окремо або в комбінації, щоб досягти більш точного виявлення вогню на зображенні.

Кожен із перелічених методів має свої переваги та недоліки, і вибір їх залежить від конкретного завдання виявлення вогню.

3.2 Аналіз апаратної частини

Застосування квадрокоптерів дозволить більш якісно організувати та здійснити виявлення пожежі. Зокрема, за допомогою відеозйомки об'єкту пожежі можна встановити вирішальний напрямок оперативних дій без залучення особового складу.

Такий літальний апарат може бути обладнаний датчиками (температури, щільності задимлення) чи інфрачервоною камерою для виявлення вогню або людей. Вимоги до апаратної частини пожежного квадрокоптера:

- курсова камера з високим розширенням та системою стабілізації

та/або тепловізійна камера, яка буде виявляти теплове випромінювання;

- GPS, який має забезпечувати точне позиціонування дрона та надавати інформацію про його місцезнаходження пожежним бригадам;
- високопродуктивний процесор, який має забезпечувати швидку обробку інформації, зокрема зображень з тепловізійної камери;
- можливість «зависання» над вказаним місцем;
- автоповернення у екстрених ситуаціях;
- захист від чинників пожежі;
- підвищена вантажопідйомність (для встановлення датчиків та аналізаторів, додаткового акумулятору чи балонів з вуглекислотою);
- автопілот (повинен забезпечувати безпечний та стабільний польот дрона, забезпечувати автоматичний поворот у разі виявлення перешкод, а також можливість автономного польоту до заданої точки).

Тепловізійна камера – це пристрій для зйомки з відображенням теплових об'єктів, температура яких вища за навколишнє середовище. Метод дослідження – безконтактний, він забезпечує безперебійну роботу під час вивчення рухомих об'єктів [20].

Принцип дії тепловізійної камери ґрунтується на перетворенні енергії інфрачервоного випромінювання в електричний сигнал, який посилюється і відтворюється на екрані індикатора. Розподіл температури відображається на дисплеї тепловізора як колірне поле, де певній температурі відповідає певний колір. Як правило, на дисплеї відображається діапазон температури видимої в об'єктив поверхні [20].

Усі об'єкти з температурою, вищою за абсолютний нуль ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$), є джерелами теплового випромінювання. Чим вища температура об'єкта, то інтенсивнішим буде випромінювання. Чим більша різниця температур різних об'єктів, то яскравішими і контрастнішими будуть зображення [20].



Рисунок 3.3 – Германієві об'єктиви та болOMETрична матриця

Тепловізійна камера відрізняється від ІР-камери лише германієвим об'єктивом та болOMETричною матрицею (рис. 3.3). Принцип формування зображення такий же самий (рис. 3.4).

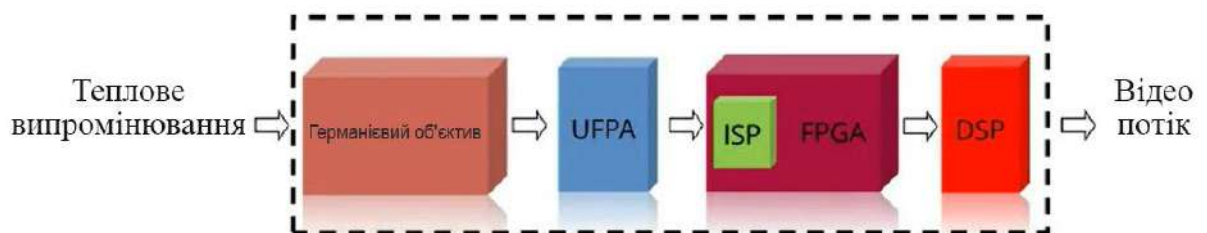


Рисунок 3.4 – Принцип формування зображення тепловізора

Залежно від функцій, які виконують тепловізори, розрізняють кілька їх видів.

- 1 Вимірювальні – видають радіометричне зображення, внаслідок чого можна визначити температурні показники всіх об'єктів у зоні спостереження. Цей вид апаратури застосовується в медицині, будівництві, промисловості, при тестуванні електрообладнання, механічних комунікацій [20].
- 2 Спостережні – забезпечують тільки візуалізацію об'єктів, знаходять застосування у військовій справі, охоронних і силових структурах, у

рятувальних операціях тощо [20].

3 Пірометри візуальні – різновид інструментів для спостереження, які здатні виявити зони з аномальним температурним режимом [20].

Вимірювальний діапазон – один із чинників, що визначає температурні можливості й умовно розділяє моделі на 3 типи.

1Будівельні: реагують на температуру до $+350^{\circ}$, застосовуються для аудиту будівельних споруд, визначають якість ізоляції, знаходять місця витоків тепла з будівель [20].

2Промислові: температурні межі понад $+350^{\circ}$, застосовуються для діагностики електромереж, промислових систем [20].

3 Високотемпературні: визначають теплові параметри понад $+1000^{\circ}$, діагностують технологічні процеси з високим рівнем нагріву [20].

Їх використання набуло широкого поширення в сучасному житті як у виробничих цілях, так і в цивільних потребах.

На даний момент основні варіанти роздільної здатності матриць на ринку, зображено на рисунку 3.5.

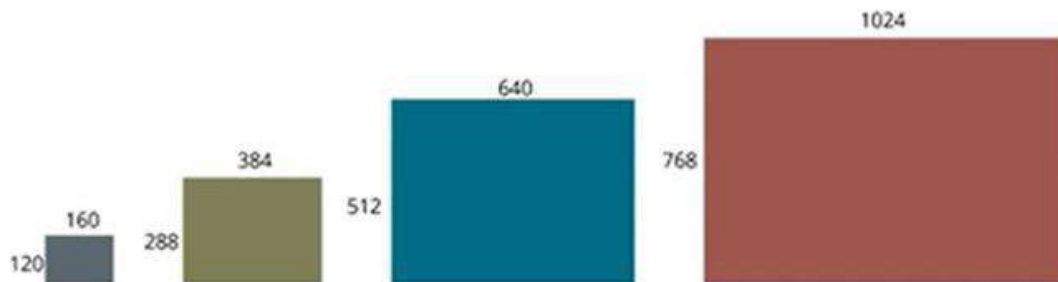


Рисунок 3.5 – Варіанти роздільної здатності матриць тепловізійних камер

Деякі з пристроїв можуть формувати дві картинки – оптичну і температурну, які можуть як відтворюватися окремо, так і накладатися одна на іншу.

Можна виділити наступні палітри зображення з тепловізійної камери, які часто застосовують: Арктика, Сіра, Залізо, Лава, Веселка, Веселка,

Веселка НС (високий контраст), налаштування зображення (автоналаштування або ручне).

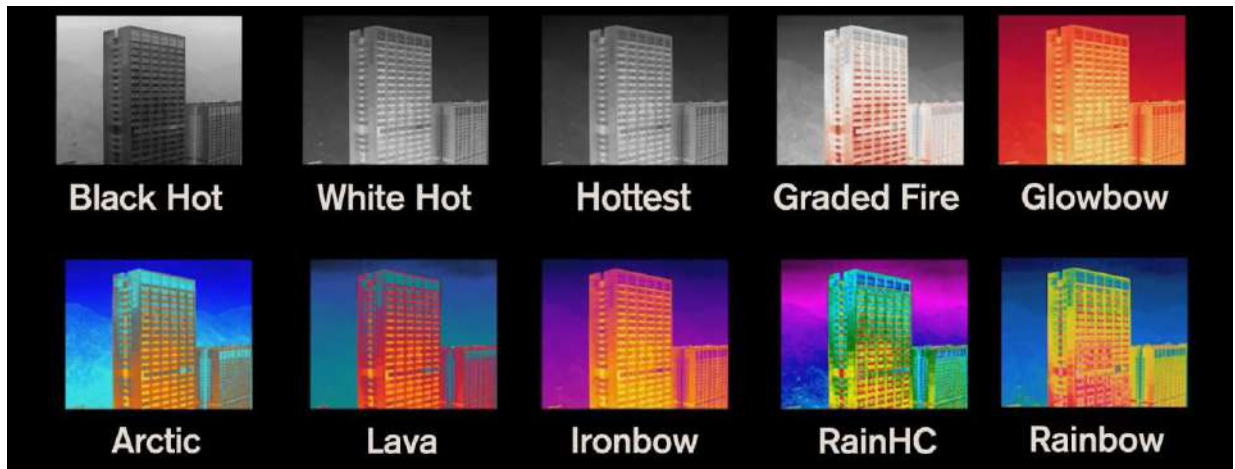


Рисунок 3.6 – Палітри зображення з тепловізійної камери

Як показує практика, відтінки сірого є найбільш інформативними.



а

б

Рисунок 3.7 – Термограма факела полум'я отримана на тепловізорі: а) у палітрі White Hot (відтінки сірого); б) у палітрі RainHC

Порівнюючи рисунок 3.7, а і 3.7, б, видно, що при використанні палітри у відтінках сірого чітко спостерігаються окремі області з високими

температурами, які добре випромінюють.

Переваги тепловізійних камер.

1) Робота в повній темряві

Тепловізори здатні ефективно працювати в значно складніших умовах порівняно зі звичайними камерами відеоспостереження. Матриця стійка до найскладніших погодних умов і здатна працювати в повній темряві [20].

2) Робота в складних умовах

Дим, туман, сніг, дощ, піщані бурі, бурхлива рослинність – попри всі складнощі система на базі тепловізійного обладнання є надійним і ефективним рішенням для цілодобового відеоспостереження [20].

3) Великі дистанції виявлення

Перед класичними системами відеоспостереження традиційно може ставитися три завдання – виявлення, розпізнавання, ідентифікація. Залежно від моделі дистанції можуть досягати різних значень, значення наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення дистанцій для виявлення, розпізнавання та ідентифікації за допомогою тепловізійного обладнання

	Для людини	Для автомобіля
Виявлення	до 1500 метрів	до 5000 метрів
Розпізнавання	до 400 метрів	до 1500 метрів
Ідентифікація	до 190 метрів	до 600 метрів

Тепловізори незважаючи на маленьку роздільну здатність їхніх матриць з цими традиційними для систем відеоспостереження цілями справляються набагато ефективніше.

4) Відсутність проблем із зустрічним засвіченням

Найпоширеніший вид зустрічного засвічення – це засвічення променями сонця, залежно від місця розташування сонячні промені можуть як значно погіршувати якість зображення, так і повністю засліплювати

камеру [20].

Якщо з незначним зустрічним засвіченням сучасні камери можуть досить ефективно справлятися. То інтенсивне засвічення – це проблема. Тепловізійні камери повністю позбавлені цього недоліку.

3.3 Аналіз програмної частини

Одним з ключових елементів програмної частини пожежних дронів є інтелектуальні режими, які допомагають операторам виконувати необхідні польотні завдання.

Програмне забезпечення дронів для виявлення та локалізації пожеж має ряд особливостей, які дозволяють дрону виявляти пожежі на ранніх стадіях та передавати інформацію про них до пожежних підрозділів.

Більшість розробників дронів на ринку пропонують режим «Thermal mode». Назви у різних виробників можуть дещо відрізнятися, але загалом сутність режимів однакова. Розглянемо інтелектуальний режим на прикладі моделі DJI Mavic 2 Enterprise Dual.

Режим «Thermal mode» поділяється на такі під режими.

1 Загальний вимір температури. Це перегляд відображення температури в режимі реального часу в центральній області екрана.

2 Точкове вимірювання температури (Spot). Потрібно торкнутися екрану пульта керування, і температура обраного об'єкта відобразатиметься в режимі реального часу [21].

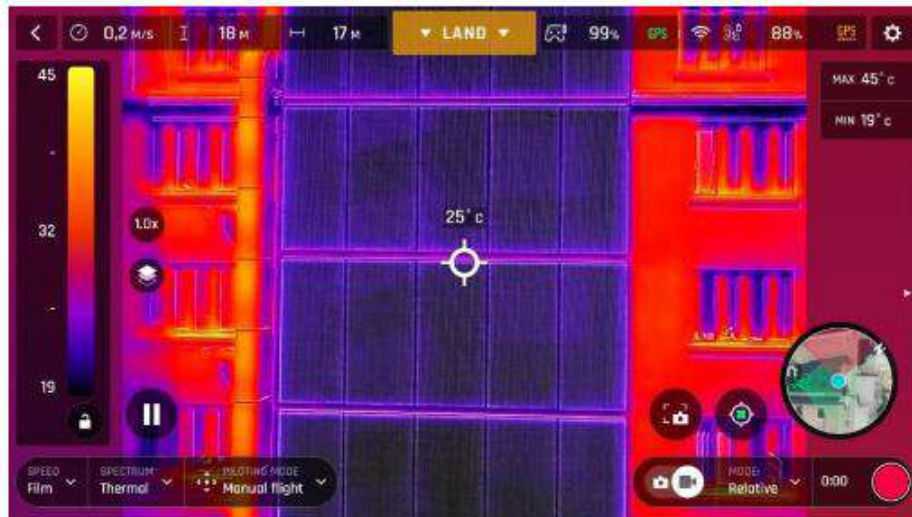


Рисунок 3.8 – Точкове вимірювання температури

3 Вимірювання температури обраної області (Regional). Можливість отримати динамічне представлення середньої температури, максимальної температури та мінімальної температури, що відображається в обраній області, яку попередньо має виділити оператор на пульті керування.

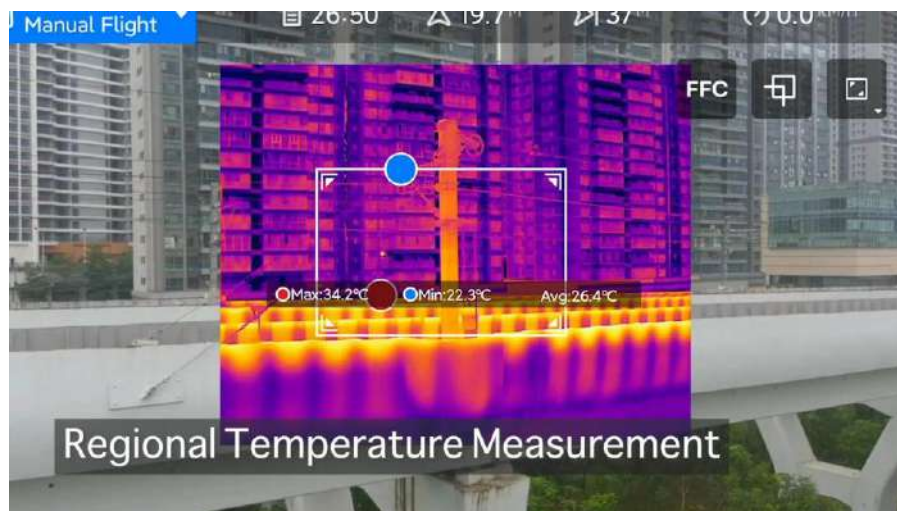


Рисунок 3.9 – Вимірювання температури обраної області

Також режим «Thermal mode» має наступні функції:

4 Температурне сповіщення: контролює температуру екрана в режимі

реального часу. Система інформує користувача, коли температура досягає встановленого порога.

5 Ізотерма: Оператор встановлює діапазон температур і система виявляє будь-які об'єкти в межах зазначених параметрів.

6 Корекція зображення: підтримує налаштування яскравості, контрасту та деталей зображення в режимі реального часу. Система виділить будь-які об'єкти в межах заданої температури [21].

7 Режим відображення «Картинка в картинці»: дозволяє об'єднати візуальні і термо- зображень, щоб допомогти користувачу швидко інтерпретувати дані та прийняти потрібне рішення [21].



Рисунок 3.10 – Режим відображення «Картинка в картинці»

Усі існуючі режими керування включають у себе залучення оператора БПЛА до керування. Не один з режимів не має автономного пошуку вогню.

Загалом, програмна частина пожежних дронів є невід'ємною складовою їхньої роботи та може допомогти пожежним підрозділам у виконанні різноманітних завдань, пов'язаних із виявленням та гасінням пожеж. Однак, для досягнення максимальної ефективності використання пожежних дронів, потрібно не лише розробити якісне програмне забезпечення, але й правильно впровадити його в пожежні процедури та

забезпечити якісну підготовку пожежних підрозділів до роботи з ним.

3.4 Комерційні пожежні БПЛА та їхні недоліки

На ринку представлені сотні варіантів безпілотників різної цільової спрямованості. Пожежних дронів не так багато і серед них виділяються кілька популярних моделей: DJI Mavic 2 Enterprise Dual, Parrot ANAFI Thermal та Autel Robotics EVO II Dual.

DJI Mavic 2 Enterprise Dual – тепловізорний дрон, який широко застосовується для моніторингу пожеж. Модифікація DUAL означає, що на дроні встановлено 2 камери, одна з яких із тепловізором, для виконання робіт у сфері енергоаудиту, моніторингу та безпеки.

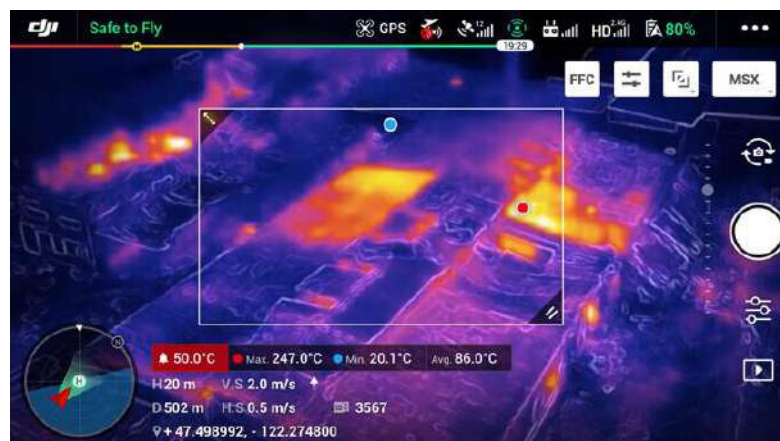


Рисунок 3.11 – Приклад роботи тепловізійної камери на DJI Mavic 2 Dual

Як тепловізор використовується модуль Lepton роздільною здатністю 160×120 пікселів, і завдяки технології FLIR MSX деталізація тепловізорного зображення підвищується до 640×480, залежно від режиму роботи. Візуальний сенсор дає змогу отримувати зображення з роздільною здатністю до 4К, а в комбінації з тепловізором пілоти отримують змогу виконувати польоти навіть в умовах щільного туману або диму [21].



Рисунок 3.12 – Зовнішній вигляд DJI Mavic 2 Enterprise Dual

Цей дрон має ще багато додаткових можливостей, таких як знімання відео у 4К, автопілот, можливість детального огляду зображення в реальному часі та дрібних додатків для різних вимог промислового використання.

У дронах DJI є інтелектуальний режим виявлення вогню, який називається «Thermal Mode». Цей режим використовує тепловізійну камеру для виявлення джерела тепла і підсвічує його на зображенні відео. Завдяки цьому оператор дрона може більш точно та швидко знайти місце пожежі та забезпечити ефективнішу реакцію на надзвичайну ситуацію. Крім того, в деяких моделях дронів DJI є можливість налаштування параметрів тепловізійної камери, що дозволяє досягати кращої якості зображення та більш точного виявлення джерела тепла [22].

В цілому, DJI Mavic 2 Enterprise Dual – це потужний і надійний дрон для використання в промислових, комерційних та рятувальних операціях.

Наступна модель Parrot Anafi Thermal – дрон із камерою 21 Мп і тепловізором дає змогу вимірювати температуру заданої області, конкретної точки, відстежувати теплові втрати, знаходити і розпізнавати об'єкти. Компактний легкий дрон, який зручно брати на виїзди .

Дрон Parrot ANAFI Thermal створений на платформі базової моделі Parrot ANAFI, на додаток до основної камери оснащений тепловізором. Тепловізійна камера, вагою всього 36,5 грама, має два сенсори і керується

програмним забезпеченням FreeFlight Thermal. Робота тепловізора заснована на базі інфрачервоного сенсора FLIR Lepton [23].

Діапазон робочих температур теплової камери: від -10°C до $+400^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 3.13 – Зовнішній вигляд Parrot ANAFI Thermal

Коптер оснащений малошумними безколекторними моторами, максимальний опір вітру – 50 км/год. Для позиціонування в просторі використовуються систему GPS, а також ультразвуковий і оптичний сенсори [24].

Parrot ANAFI оснащений тільки датчиком землі. Функція розпізнавання та ухилення від перешкод не передбачена.

У дронів Parrot є інтелектуальний режим виявлення вогню, який називається «Fire Mode» (режим вогню). Цей режим використовує тепловізійну камеру для виявлення гарячих об'єктів, які можуть бути пов'язані з вогнем, і дає можливість оператору дрону побачити ці об'єкти на екрані свого смартфона або планшета. Інтелектуальний алгоритм дозволяє ідентифікувати можливий вогонь та вручну додати його на карту, що дозволяє ефективно виконувати місії по гасінню пожеж, а також допомагає оператору дрону зосередитися на найбільш критичних областях.

У порівнянні з DJI Mavic 2 Enterprise Dual, Parrot ANAFI Thermal має меншу роздільну здатність тепловізійної камери та менший час польоту, але має значно меншу вагу і більш доступну ціну.

Autel Robotics EVO II Dual – перший 8K дрон, з інфрачервоною камерою. Теплова роздільна здатність до 640×512 і сенсор 8K EVO 2. Цей дрон часто використовують служби швидкого реагування, мисливці, компанії, які виконують моніторингові операції. Він підходить для підрядників і власників бізнесу, яким потрібен компактний і портативний дрон, здатний покрити будь-яку потребу в промисловому дроні [25].



Рисунок 3.14 – Зовнішній вигляд Autel Robotics EVO II Dual

Дрон оснащений тепловізійною камерою FLIR Boson, яка має найкращу роздільну здатність у своєму класі. Компактна і функціональна з роздільною здатністю 640x512 дає змогу пілотам EVO II Dual знімати об'єкти з великою кількістю деталей з відстані до 146 метрів. Це в 4 рази далі, ніж у будь-якого іншого дрона цього класу. Частота оновлення – 9 Гц [25].

Дрон має камеру з двома датчиками: стандартну 8K та інфрачервону камеру. Пристрій може працювати у звичному видимому, інфрачервоному та подвійному режимах. Камера робить інфрачервоні зображення з роздільною здатністю 640x512 (640) або 320x256 (320) і записує відео 720p зі швидкістю 30 кадрів на секунду в звичайному і у режимі подвійного зображення [25].

Всі три модулі камери підтримують безліч режимів зйомки, зокрема:

- 8 покадровий;
- 9 серійна зйомка;
- 10 брекетинг автоекспозиції (АЕВ);
- 11 таймлапс;
- 12 зображення з розширеним динамічним діапазоном (HDR);
- 13 Nightbeat (високе відношення сигнал/шум) [25].

У дронів Autel є інтелектуальний режим виявлення вогню, який називається «Thermal Detection». Цей режим використовує тепловізійну камеру, щоб виявляти області з підвищеною температурою, що може бути ознакою вогню. При виявленні таких областей, режим видає сповіщення на екрані дистанційного керування дроном, що дозволяє оператору зосередитись на цих областях та виконати більш детальний аналіз. Крім того, деякі моделі дронів Autel мають можливість збільшувати конфігурацію тепловізійної камери, що дозволяє досягати кращої якості зображення та більш точного виявлення гарячих точок, в тому числі вогню.

У порівнянні з DJI Mavic 2 Enterprise Dual та Parrot ANAFI Thermal, Autel Robotics EVO II Dual має найбільшу роздільну здатність тепловізійної камери, найбільший час польоту, максимальну швидкість та найбільший радіус дії від пульта керування. Однак, його ціна є значно вищою, ніж у Parrot ANAFI Thermal.

Нижче наведена таблиця 3.2 з порівняльними характеристиками цих дронів.

Таблиця 3.2 – Порівняльні характеристики популярних дронів, які використовують для виявлення пожеж

Назва дрона	DJI Mavic 2 Enterprise Dual	Parrot ANAFI Thermal	Autel Robotics EVO II Dual
Характеристики			
Вага	0,9 кг	0,31 кг	1,12 кг
Максимальна швидкість	72 км/год	55 км/год	72 км/год

Продовження таблиці 3.2

Назва дрона	DJI Mavic 2	Parrot ANAFI	Autel Robotics
Характеристики	Enterprise Dual	Thermal	EVO II Dual
Максимальна висота польоту	6 км над рівнем моря	4 км над рівнем моря	7 км над рівнем моря
Максимальний час польоту	до 30 хвилин	до 26 хвилин	до 40 хвилин
Роздільна здатність тепловізійної камери	640 x 512 пікселів	160 x 120 пікселів	640 x 512 пікселів
Роздільна здатність звичайної камери	48 Мп	21 Мп	48 Мп
Зум	Оптичний 2x, цифровий 3x	Цифровий 3x	Оптичний 8x
Максимальний радіус дії від пульту керування	8 км	4 км	9 км
Діапазон робочих температур	-10 °С до 40 °С	-10 °С до 40 °С	-10 °С до 45 °С
Кути огляду під час зйомки відео	77°	69°	79°
Макс. злітна маса	905 г	315 г	2000 г
Вартість	139 159 грн	116 544 грн	280 000 грн

Проведений аналіз свідчить про те, що більшість доступних комерційних дронів не володіють автоматичними режимами щодо виявлення відкритого вогню. Тому в роботі пропонується розробка алгоритму виявлення полум'я, який може бути використаний для оснаження їм користувацький дронів.

4 РОЗРОБКА АВТОМАТИЧНОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ GPS КООРДИНАТ ПОЖЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА

4.1 Загальна концепція інтелектуального режиму для гасіння пожежі

Безпілотні повітряні судна, проробивши ривок у цивільній сфері застосування, освоїли ринок і безліч прикладних завдань. Але більшість апаратів при високотехнологічному вмісті має застарілий підхід «людина-безпілотник», де оператор отримує інформацію з камери і приймає рішення. У сучасних умовах роботи пожежних служб багатогодинне спостереження оператором під час моніторингу великих площ призводить до зниження уваги і зайвих витрат на підтримання штатної чисельності. Також окремо варто відзначити додаткові витрати електроенергії на борту судна для передачі відеосигналу на базову станцію та його низьку якість у зв'язку з втратами під час передачі. Класично цю проблему вирішують установкою на судно інфрачервоних камер, здатних вимірювати температуру з висоти польоту, які сигналізують оператору про знаходження об'єкта з температурою вище порогового значення [27].

Проаналізувавши існуючі комерційні рішення, виявлено, що популярні моделі пожежних дронів не мають інтелектуального режиму, який міг би виявляти пожежу, сигналізувати про неї та визначати координати без участі оператора.

Саме тому пропонується концепція інтелектуального режиму виявлення пожежі, блок-схема якого зображена на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Блок-схема інтелектуального режиму

Розглянемо мультикоптер на який встановлена камера, яка спрямована перпендикулярно до землі (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Схематичне зображення положення камери на мультикоптері

Алгоритм роботи інтелектуального режиму пошуку вогню наступний.

1 Пожежна команда запускає дрон над лісним масивом, попередньо визначивши область патрулювання.

2 Дрон летить в автономному режимі над місцевістю по заданим точкам постійно на фіксованій висоті.

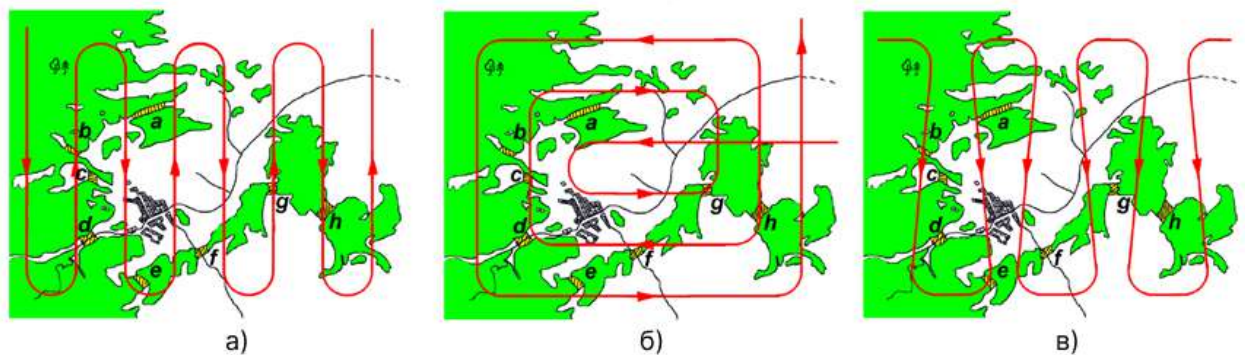


Рисунок 4.3 – Способи пошуку та планування маршрутів

а) «Паралельні галси», б) «Розбіжна коробочка», в) «Галси, які сходяться»

3 Відбувається захоплення відеопотоку з камери встановленої на борту БПЛА.

4 Якщо відбувається виявлення вогню, то передається сигнал тривоги на наземний пункт керування, у іншому випадку патрулювання продовжується.

5 Якщо відбулося виявлення вогню, дрон зависає на місці та орієнтується на Північ для визначення GPS координат.

6 GPS координати передаються на наземний пункт керування та додаються на карту польотного завдання.

7 Дрон летить на визначені координати, знажує висоту до безпечної, та скидає балони з вуглекислотою.

8 Після чого відбувається повернення до точки запуску дрона.

4.2 Метод виявлення вогню за фотографією місцевості

Провівши аналіз, було виявлено, що використання класичної кольорової камери для виявлення пожежі, потребує великого об'єму пам'яті та потужного обчислювача на борту для об'єднання декількох методів виявлення вогню для того, щоб знизити вірогідність помилки виявлення. Також звичайна камера не здатна реєструвати теплове випромінювання і не може точно виявити вогонь, особливо в умовах поганої видимості, наприклад, вночі або при сильному димі.

Саме тому у роботі буде застосовуватися тепловізійна камера та метод порогової обробки зображень. Перевага такого методу у відсутності потреби у великих об'ємах пам'яті та потужних обчислювальних ресурсів на борту БПЛА.

Для наглядного прикладу будемо використовувати тепловізійну камеру Autel Robotics EVO II 640T з наступними технічними характеристиками:

14тепловий сенсор FLIR Boson;

15 роздільна здатність: 384x288;

16 FOV: 34°;

17 об'єктив: 6,3 мм;

18 крок пікселя: 12 мкм;

19 довжина хвилі: 7.5 - 13.5 мкм [27].

Термодатчик має налаштування низького і високого посилення для зчитування температур від -20°C ~ 550°C [27].



Рисунок 4.4 – Зовнішній вигляд тепловізійної камери Autel Robotics EVO II 640T

Для обробки зображення буде використовуватися палітра у відтінках сірого. Вона переважна для виявлення вогню, оскільки дозволяє більш чітко виділити області з високою температурою, які можуть свідчити про наявність пожежі.

Крім того, палітра у відтінках сірого є універсальною і застосовується в більшості тепловізійних камер.

На рисунку 4.5 зображена блок-схема виявлення вогню на зображенні.



Рисунок 4.5 – Блок-схема алгоритму виявлення вогню на зображенні

Для виявлення вогню використаємо метод порогової обробки зображення. Операція порогової обробки полягає в порівнянні значення рівня яскравості пікселів зображення зі встановленим значенням порога:

$$p(x, y) = \begin{cases} 1, f(x, y) \geq t \\ 0, f(x, y) < t, \end{cases} \quad (4.1)$$

де t – поріг, f – вихідне зображення. Пікселям зображення, значення яскравості яких вище за поріг, присвоюється «1», нижче за поріг присвоюється «0» [28].

Координати пікселів $p(x, y)$, значення яких «1» і є координатою пожежі в системі координат матриці тепловізійної камери.

Для визначення GPS координат пожежі необхідно позбавитися від піксельної системи координат. Для цього використаємо відносну проміжну лінійну систему координат в метрах.

Визначимо ціну одного пікселю в метрах, для цього необхідно знати роздільну здатність матриці та кут огляду α , для обраної камери вони складають: 384×288 та $\alpha = 34^\circ$, нехай висота польоту буде $h = 75$ м, для обчислення шуканих даних зроблено рис. 4.6.

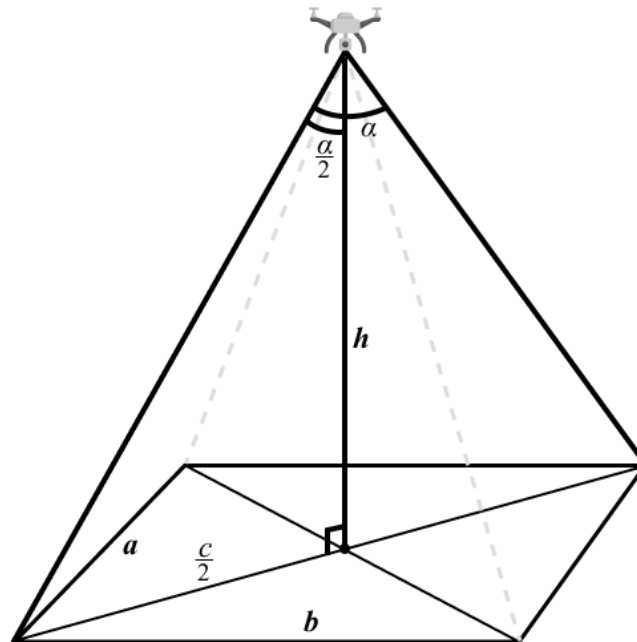


Рисунок 4.6 – Геометричне співвідношення для обчислення ціни пікселю

Припускаємо, що дрон знаходиться по центру зображення, яке бачимо з камери, для цього вона має бути встановлена перпендикулярно до землі.

Так як піксель квадратний, то можна визначити його ціну в метрах або через a , або через b :

$$Px_1 = \frac{a}{288} \quad (4.2)$$

$$Px_2 = \frac{b}{384}$$

де a, b – сторони прямокутника в метрах.

Оскільки роздільна здатність матриці 384x288, тобто формату 4:3, то отримуємо залежність:

$$\frac{b}{a} = \frac{4}{3} \Rightarrow b = a \frac{4}{3} \quad (4.3)$$

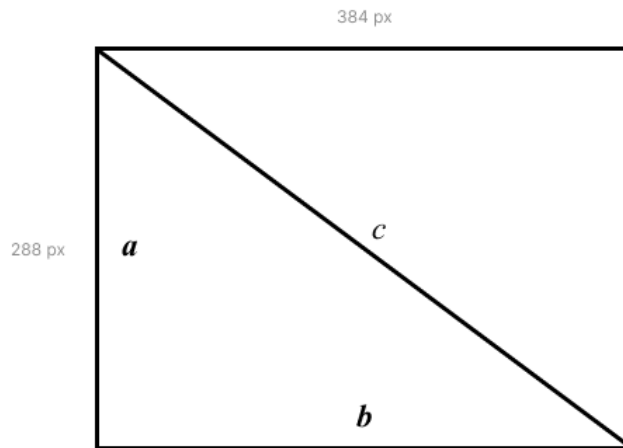


Рисунок 4.7 – Прямокутник для обчислення ціни пікселю

Знайдемо сторону a в прямокутному трикутнику за теоремою Піфагора:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{a^2 + \left(\frac{4}{3}a\right)^2}; \quad (4.4)$$

$$c^2 = a^2 + \frac{16}{9}a^2; \quad (4.5)$$

$$a^2 + \frac{16}{9}a^2 = c^2; \quad (4.6)$$

$$\frac{9}{9}a^2 + \frac{16}{9}a^2 = c^2; \quad (4.7)$$

$$\frac{25}{9}a^2 = c^2; \quad (4.8)$$

$$a = \sqrt{\frac{9c^2}{25}} \quad (4.9)$$

Оскільки висота та кут огляду відомі, то можемо знайти гіпотенузу c за тригонометричним співвідношенням (рисунок 4.6):

$$c = 2ctg \frac{\alpha}{2} \cdot h = 2ctg(17^\circ) \cdot 75m = 2 \cdot 3,2709 \cdot 75m = 490,635m \quad (4.10)$$

Тоді:

$$a = \sqrt{\frac{9c^2}{25}} = \sqrt{\frac{9 \cdot (490,635m)^2}{25}} = \sqrt{\frac{2166504,329m^2}{25}} = 294,381m; \quad (4.11)$$

$$b = a \frac{4}{3} \Rightarrow b = 294,381m \cdot \frac{4}{3} = 392,508m \quad (4.12)$$

Тепер розраховуємо ціну пікселя у метрах:

$$P_x = \frac{a}{288} = \frac{294,381}{288} = 1,022m \quad (4.13)$$

На вибір висоти польоту БПЛА впливає багато факторів, один серед яких – результуюча роздільна здатність пікселя щодо наземних об'єктів, які підлягають виявленню. Необхідна роздільна здатність визначається критерієм Джонсона.

Ця методика було розроблено в 1950-ті роки для прогнозування

ефективності систем датчиків. Американський дослідник Джон Джонсон виміряв здатність спостерігачів розпізнавати масштабні моделі об'єктів у різних умовах і за результатами цієї роботи сформулював критерії мінімальної необхідної роздільної здатності. Ці критерії забезпечують 50% ймовірність того, що спостерігач зможе розпізнати об'єкт на заданому рівні [29].

Для тепловізійних камер застосовуються такі рівні для критерію Джонсона:

20 Не менше 1,5 пікселя для виявлення – спостерігач може виявити наявність об'єкта.

21 Не менше 6 пікселів для розпізнавання – спостерігач може визначити вид об'єкта (наприклад, людина, що стоїть перед огорожею).

22 Не менше 12 пікселів для ідентифікації – спостерігач може визначити об'єкт і його характеристики (наприклад, людина з фомкою в руці).



Рисунок 4.8 – Приклад зображення об'єкта на різній кількості пікселів

Критерій Джонсона розробляли в припущенні, що візуальну інформацію обробляє спостерігач-людина. Якщо інформація обробляється програмним алгоритмом, вимоги до кількості пікселів, яку має займати цільовий об'єкт для надійної роботи алгоритму, можуть бути іншими. Слід зазначити, що навіть якщо людина здатна виявити об'єкт, для надійної роботи програмного алгоритму часто потрібна більша кількість пікселів при заданій дальності виявлення [29].

Таким чином згідно цього критерія дрон для ціни пікселя в 1 м, може виявляти пожежі за габаритом понад 1 м. Для того щоб виявляти менші точки загоряння необхідно або використовувати камери із більшою роздільною здатністю, або зменшити висоту польоту.

4.3 Метод визначення GPS координат пожежі

Для того, щоб визначити GPS координати об'єкту на зображенні при відомих піксельних координатах, використовуємо проміжну лінійну координатну систему в метрах, тому що лінійні координати мають жорстку прив'язку до GPS координат, а піксельні – ні, через їх різну ціну в лінійних координатах через різні фактори (висота польоту, кут огляду камери).

Ціна пікселя на зображенні з камери в GPS координатах Px_{GPS} визначається як добуток ціни пікселя в метрах Px_m на значення 1 м в GPS координатах, яке дорівнює $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м/}^\circ$:

$$Px_{GPS} = Px_m \cdot \frac{1,5}{10^5} \quad (4.14)$$

Точність ціни ділення пікселя в GPS координатах залежить від точності вимірювання GPS.

На рисунку 4.9 зображена блок-схема визначення GPS координат пожежі, яка виникла в точці B , а дрон знаходиться в точці A .

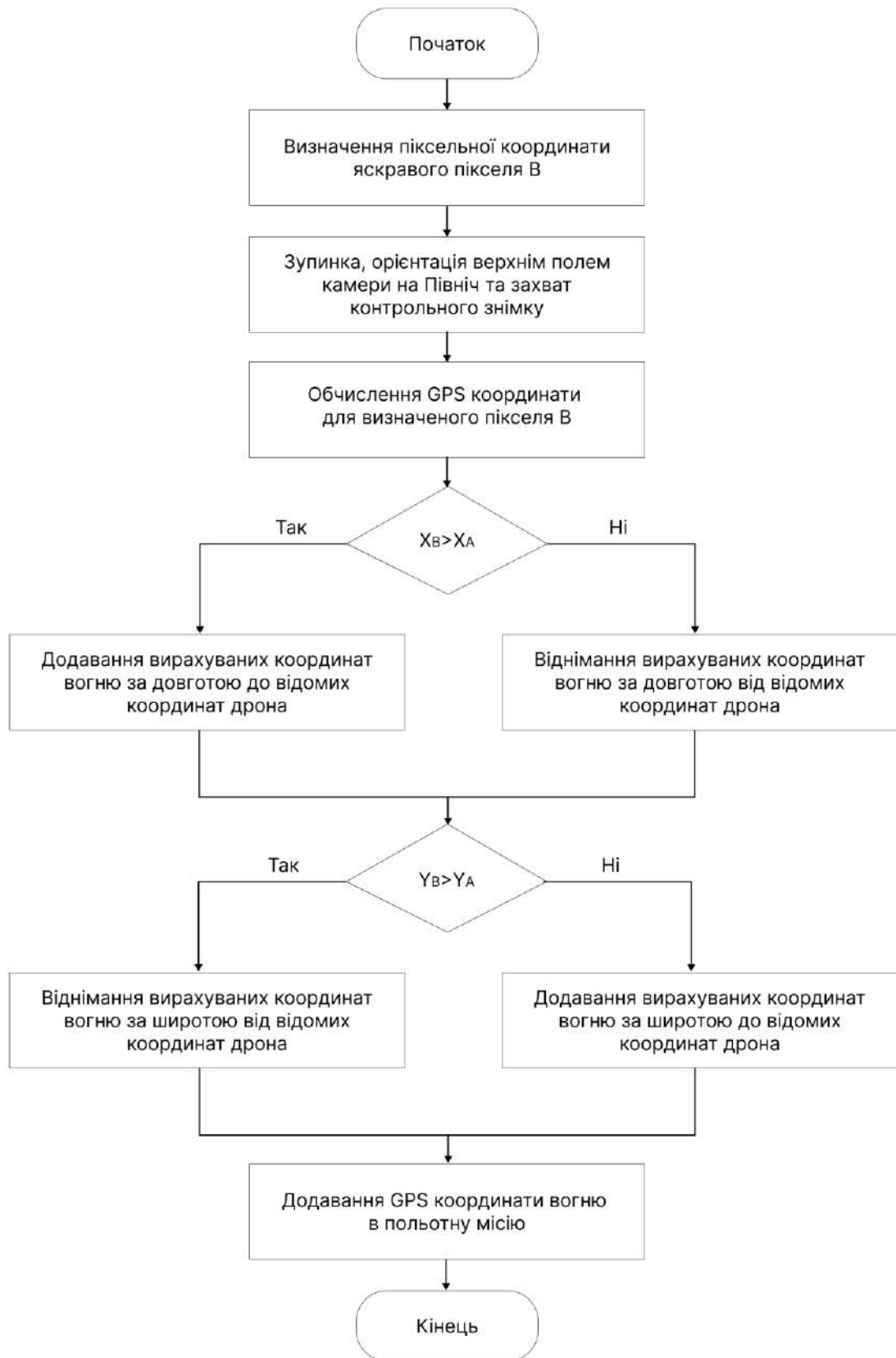


Рисунок 4.9 – Блок-схема алгоритму виявлення GPS координат вогню

Розглянемо більш детально розрахунок GPS координат вогню.

Вхідні дані:

23 піксельні координати дрона;

24 GPS координати дрона;

25 визначені піксельні координати вогню.

Дрон має GPS модуль, який постійно вичисляє поточні GPS координати борту. Припускаємо, що дрон знаходиться по центру зображення, яке бачимо з камери, тоді відомі, GPS координати центрального пікселю (тобто дрону):

$$A(x, y) \Rightarrow A(\overset{Д}{192}, \overset{Ш}{144}) \Rightarrow A(49.9935, 36.2304) \quad (4.15)$$

де координата x – довгота, y – широта.

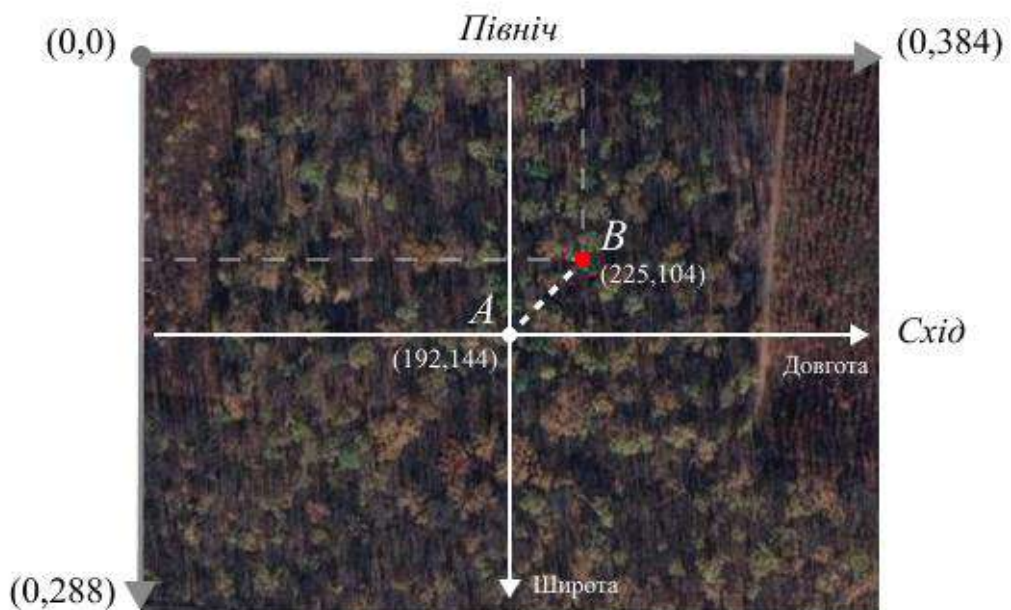


Рисунок 4.10 – Схематичне зображення відносної координатної системи дрона

Розглянемо алгоритм визначення GPS координат вогню.

1 Коли у кадр потрапляє піксель яскравіший за заданий поріг, то дрон зупиняється та позиціонується верхнім полем камери на Північ і робить контрольний кадр зображення.

2 Визначається піксельна координата яскравого пікселю (вогню) точки B :

$$\begin{array}{l} \text{Д} \quad \text{Ш} \\ A(192,144) \\ B(225,104) \end{array} \quad (4.16)$$

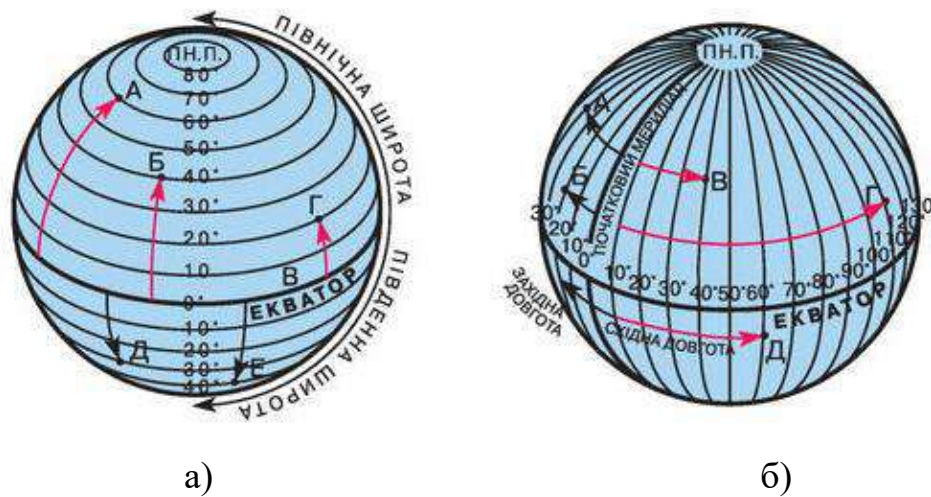


Рисунок 4.11 – Визначення географічної а) широти, б) довготи

3 При такому позиціонуванні дрону верхнім полем камери на Північ, отримуємо наступне:

26 Якщо довгота піксельних координат знайденого вогня B більше, ніж довгота координати A , то додаємо до GPS координати дрона Px_{GPS} за формулою 4.14. В іншому випадку навпаки. Це пов'язано з тим, що градуси зростають від початкового меридіана (рис. 4.11).

$$\begin{array}{l} x_B > x_A \Rightarrow GPS_{\text{Д}} + Px_{\text{GPS}} \\ x_B < x_A \Rightarrow GPS_{\text{Д}} - Px_{\text{GPS}} \end{array} \quad (4.17)$$

27 Якщо широта піксельних координат знайденого вогня B більше, ніж широта координати A , то віднімаємо від GPS координати дрона Px_{GPS} (формула 4.14). В іншому випадку навпаки. Це пов'язано з тим, що від Екватора до Північного полюсу градуси зростають (рис. 4.11).

$$\begin{aligned} y_B > y_A &\Rightarrow GPS_{III} - Px_{GPS} \\ y_B < y_A &\Rightarrow GPS_{III} + Px_{GPS} \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.4 Результати роботи методу

Розробимо програму в середовищі MatLab, яка буде реалізовувати запропонований алгоритм пошуку вогню та визначення GPS координати.

Будемо використовувати рисунок 4.12 на якому зімітоване зображення з тепловізійної камери з джерелом вогню.



Рисунок 4.12 – Вхідне зображення image.jpg розміром 384x288 пікселів

У лістингу 1 функція `imread` використовується для завантаження зображення з файлу `image.jpg` (рисунок 4.12). Поріг яскравості встановлюється на значення 180 за допомогою змінної `threshold`. Зображення перетворюється на чорно-біле зображення, і за допомогою `find` отримується список індексів пікселів, яскравість яких вище встановленого порогу. Зі списку індексів, отриманих за допомогою `find`, отримується список координат відповідних пікселів за допомогою `ind2sub`. Координати виводяться за допомогою `fprintf`, а зображення з виділеними яскравими пікселями показується за допомогою `imshow` та `plot`.

Лістинг 4.1 – Програмна реалізація пошуку вогня на зображенні у середовищі MatLab

```
% Завантажуємо зображення
img = imread('image.jpg');

% Визначаємо поріг яскравості
threshold = 180;

% Отримуємо пікселі, яскравість яких вище встановленого порогу
bright_pixels = find(img > threshold);

% Отримуємо координати відповідних пікселів
[y, x] = ind2sub(size(img), bright_pixels);

% Виводимо координати яскравих пікселів
fprintf('Знайдено %d яскравих пікселів:\n',
numel(bright_pixels));
for i = 1:numel(bright_pixels)
    fprintf('( %d, %d)\n', x(i), y(i));
end

% Показуємо зображення з виділеними яскравими пікселями
imshow(img);
hold on;
plot(x, y, 'r+', 'MarkerSize', 10);
```

На рисунку 4.12 зображено результуюче зображення зі знайденом джером вогня та визначенні піксельні координати (рисунок 4.13).

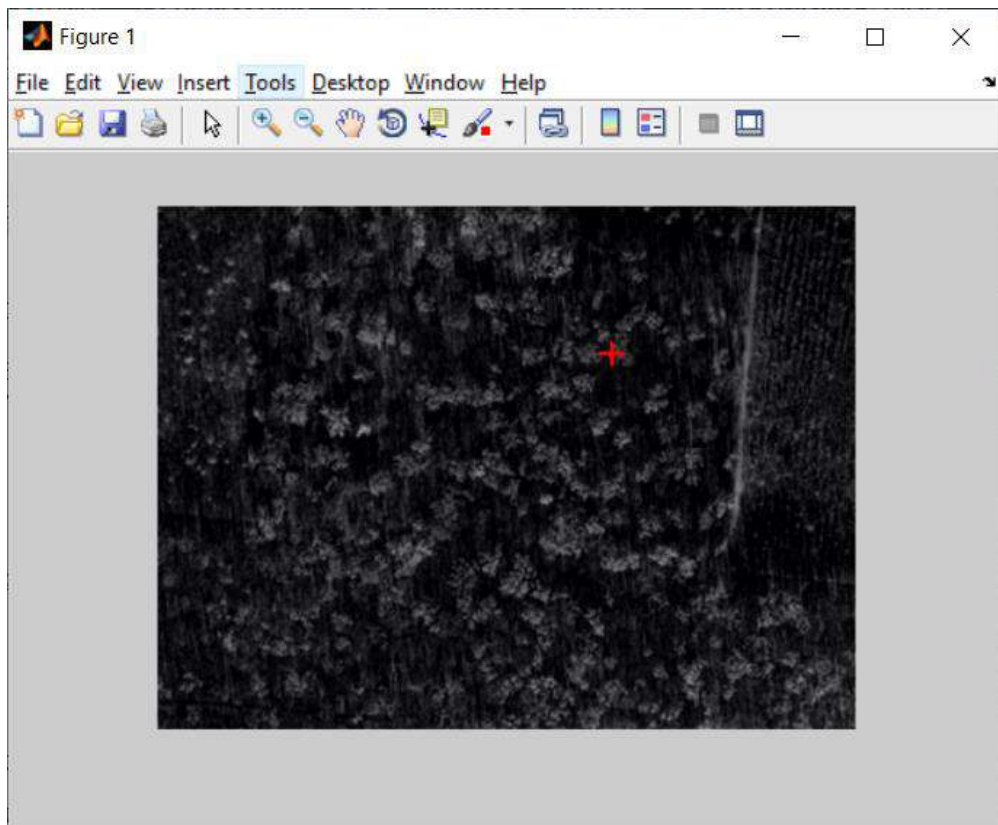


Рисунок 4.12 – Вихідне зображення

```
Знайдено 3 яскравих пікселів:
(250, 81)
(250, 82)
(251, 82)
```

Рисунок 4.13 – Масив знайдених пікселів

Визначемо GPS координату пожежі за запропонованим алгоритмом. Для цього розроблено програму, яка показана у лістингу 2.

Лістинг 4.2 – Програмна реалізація визначення GPS координати вогня у середовищі MatLab

```
% Відома GPS координата для пікселя (192, 144)
pixel_Ax = 192;
```

```

pixel_Ay = 144;
lat_known = 49.9935;
lon_known = 36.2304;

% Розміри зображення та масштаб GPS координат
image_width = 384;
image_height = 288;
gps_scale = 1.5/10^5; % 1 піксель = 1,5 /10^5 м/градуси GPS
координати

% Координати пікселя, для якого потрібно обчислити GPS
координату
pixel_Bx = 250;
pixel_By = 81;

% Ціна пікселів в метрах Pxm
pixm = 1;

% Обчислення PxGPS
px_gps_lat = pixm * gps_scale;
px_gps_lon = pixm * gps_scale;

% Обчислення GPS координати для пікселя (250, 81)
if pixel_Bx > pixel_Ax
    delta_lonx= px_gps_lon*(pixel_Bx-pixel_Ax); %визначаємо
дельту
lon = lon_known + delta_lonx;
elseif pixel_Bx < pixel_Ax
    delta_lonx= px_gps_lon*(pixel_Ax-pixel_Bx);
    lon = lon_known - delta_lonx;
end

if pixel_By > pixel_Ay
    delta_laty= px_gps_lat*(pixel_By-pixel_Ay);
lat = lat_known - delta_laty;
elseif pixel_By < pixel_Ay
    delta_laty= px_gps_lat*(pixel_Ay-pixel_By);
    lat = lat_known + delta_laty;
end

% Виведення результату
disp(['GPS координати пікселя (250, 81): ', num2str(lat), ', ', ', ',
num2str(lon)]);

```

Розроблена програма визначає GPS координати вогня за запропонованим алгоритмом (рисунок 4.14).

```
GPS координати пікселя (250, 81): 49.9944, 36.2313  
>> |
```

Рисунок 4.14 – Визначені GPS координати пожежі

Результат обчислення виводиться на екран у вигляді GPS координат пікселя.

Впровадження даного інтелектуального режиму в СК БПЛА може поліпшити ефективність роботи пожежників. Використання БПЛА дозволяє отримувати високоякісні зображення та дані з повітряного простору, що сприяє ефективному контролю та реагуванню на пожежні ситуації. Запропонований метод дозволяє зробити виконання пожежних робіт більш ефективним з меншим залученням операторів до керування БПЛА.

ВИСНОВКИ

Інтелектуальні методи керування БПЛА є важливою складовою сучасних безпілотних систем. Вони дозволяють пілотувати та керувати дроном з високою точністю та ефективністю, автоматично виконуючи різноманітні завдання.

У цьому контексті БПЛА можуть використовуватися для збору інформації з висоти, що дозволяє збільшити площу, яку можна охопити відразу. Завдяки цьому БПЛА можуть використовуватися для виявлення вогню на великих територіях, таких як лісові масиви, де можливість вчасного виявлення вогню є критично важливою.

У даній роботі був проведений аналіз та класифікація БПЛА. Були розглянуті різні сфери їх застосування, такі як розвідка, моніторинг, пошук і порятунок людей, агропромислове виробництво та інші. Також була проведена класифікація БПЛА за різними критеріями, такими як маса, спосіб пілотування, тип крила тощо.

Далі було розглянуто методи управління БПЛА, включаючи математичну модель апарату, методи навігації та використання GPS позиціонування. Були описані основні принципи роботи GPS системи та її роль у навігації БПЛА.

Окрему увагу було приділено інтелектуальним польотним режимам БПЛА. Вони включають автоматичне пілотування, точне позиціонування, виявлення перешкод та інші функції, які дозволяють дрону автономно виконувати завдання з високою точністю. Інтелектуальні режими керування забезпечують автоматизацію процесів та підвищують продуктивність БПЛА.

Далі був проведений аналіз програмно-апаратного комплексу БПЛА для задач пожежної безпеки. Були розглянуті методи виявлення вогню на зображенні та аналіз апаратної та програмної частини комплексу. Також були розглянуті комерційні пожежні БПЛА та їхні недоліки.

У завершальному розділі був розроблений автоматичний метод виявлення та визначення GPS координат пожежі з використанням БПЛА. Була описана загальна концепція інтелектуального режиму для гасіння пожежі, яка включає в себе виявлення вогню на фотозображенні місцевості та GPS координат пожежі. Було знайдено ціну пікселю у метрах $P_x = 1,022_m$ для заданих параметрів матриці 384×288 , куту огляду $\alpha = 34^\circ$ і висоти польоту $h = 75_m$. Визначено ціну пікселя на зображенні з камери в GPS координатах $P_{x_{GPS}}$. Були представлені результати роботи методу в середовищі MatLab.

Запропонований метод визначення координат пожежі залежатиме від точності вимірювання ціни пікселю на зображенні з камери в метрах P_{x_m} та точності вимірювання ціни пікселя в GPS координатах $P_{x_{GPS}}$. Визначення координат цілі не вимагатиме значних обсягів пам'яті та потужних обчислювальних ресурсів.

Задача є актуальною в даний час, оскільки безпілотні літальні апарати знаходять все більше застосування в пожежній діяльності. Широке застосування квадрокоптерів у профілактиці виникнення пожежі та ранньому виявленні – це майбутнє пожежної безпеки.

Результати даної кваліфікаційної роботи були опробовані на десятій міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації».

В роботі розроблено автоматичний методу виявлення та визначення GPS координат пожежі з використанням БПЛА. Ці дослідження сприяють розвитку безпілотної авіації та можуть мати практичне застосування в різних галузях, зокрема у сфері пожежної безпеки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Теорія і практика застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) – Київ: ЛІТЕРА, 2023. – 126 с. – (978-966-370-793-8).
2. Федосєєва Н. А. Перспективні галузі застосування безпілотних літальних апаратів / Н. А. Федосєєва. – 2019. – С. 26–29.
3. Бережний А. О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об’єктів : дис. канд. техн. наук : 05.13.06 / Бережний А. О. – Харків, 2020. – 192 с.
4. Sydorenko, Serhii & Sydorenko, Svitlana. (2021). Аналіз горимості лісів України як передумова лісопожежного районування. *Forestry and Forest Melioration*. 91-101. 10.33220/1026-3365.137.2020.91.
5. Класифікація БПЛА за льотними характеристиками [Електронний ресурс] // Geoscan LTD – Режим доступу до ресурсу: <https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/const-module/classification/classification.html>.
6. Інгабіре А. Прикладні методи синергетичного синтезу систем керування безпілотними літальними апаратами з жорстким крилом: дис. канд. техн. наук : 2.3.1. / Інгабіре Аліні – Таганрог, 2021. – 252 с.
7. . J. Xiong, E. Zheng, “Position and attitude tracking control for a quadrotor UAV”, *ISA (Instrum Soc Am) Trans*, 53 (3) (2014), pp. 725-731, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.01.004>.
8. Іваненко Ю. В. Огляд методів керування безпілотними літальними апаратами / Ю. В. Іваненко, О. С. Ляшенко, Т. В. Філімончук // Системи управління, навігації та зв’язку. – 2023. – С. 26–30.
9. Nguyen H. Control Algorithms for UAVs: A Comprehensive Survey / H. Nguyen, T. Quyen, C. Nguyen. // *Industrial Networks and Intelligent Systems*. – 2020. – С. 1–11.

10. . Liu, A. Y. Chen, Y. Huang, J. Han, J. L., Shih-Chung Kang, T. Wu, M. Wen, M. Tsai (2014), “A review of rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering”, *Smart Structures and Systems*,. – 2014. – С. 1065–1094, doi: <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2014.13.6.1065>.

11. Muhammad Maaruf, Magdi Sadek Mahmoud, Alfian Ma'arif (2022), “A Survey of Control Methods for Quadrotor UAV”, *International Journal of Robotics and Control Systems* Vol. 2, No. 4, 2022, pp. 652-665, available at: <https://pubs2.ascee.org/index.php/ijrcs>.

12. Gritsenko v. Integral adaptive autopilot for an unmanned aerial vehicle / V. Gritsenko, O. Volkov. // *Aviation*. – 2018. – С. 129–135.

13. Козуб А. М. Аналіз засобів збору інформації для географічних інформаційних систем / Козуб А. М., Суворова Н. О., Чернявський В. М. // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2011. – № 3(27). – С. 42–47.

14. Березіна С. І., Логачов С. В., Солонець О. І. Метод координатної прив'язки знімків, отриманих з БПЛА, за елементами зовнішнього орієнтування. *Системи озброєння і військова техніка*, 2018. Вип. (1). С. 76-83.

15. Режими пілотування з дрона: особливості та відмінності [Електронний ресурс] // *DJI Гід покупця*. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.djimsk.ru/guides/2020/10/09/rezhimi-pilotirovaniya-s-drona-osbennosti-i-razlichiya/>.

16. Аполлонов Д.В., Бібікова К.І., Шибасєв В.М., Єфімова І.Є. Формування алгоритмів системи автоматичного управління перетвореного безпілотного літального апарату // *Праці МАІ*. 2022. № 122. DOI: 10.34759/trd2022-122-23

17. Лук'яниця А.А. Цифрова обробка відеозображень. / Лук'яниця А.А., Шишкін А.Г. // *Ай-Ес-Ес Пресю* – 2009. - 518 с.

18. Калач А. В. Алгоритм розпізнавання полум'я з борту безпілотного повітряного судна / А. В. Калач, А. В. Витовтов, Т. Н. Куликова. // *Вісник інституту ВПС*. – 2017. – С. 86–89.

19. Cetin A.E., Dimitropoulos K., Gouverneur B., Grammalidis N., Günay O., Habiboglu Y.H., Töreayind B.U., Verstockt S. Video fire detection – review // Digital Signal Processing. 2013. V. 23, no. 6, P. 1827-1843.

20. Тепловізійні камери відеоспостереження - 7 переваг [Електронний ресурс] // Інтемс – Режим доступу до ресурсу: <https://securityrussia.com/blog/kamery-teplovizory.html>.

21. Серія Mavic 2 Enterprise. Посібник користувача v1.8 [Електронний ресурс] // DJI. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_2_Enterprise/20200610/Mavic_2_Enterprise_Series_User_Manual-RU.pdf.

22. Ke Lu. Flight Dynamics Modeling and Dynamic Stability Analysis of Tilt-Rotor Aircraft, International Journal of Aerospace Engineering, 2019, no. 2, pp. 1-15. DOI: 10.1155/2019/5737212

23. Anafi Thermal. User Guide v.6.7.0.1 [Електронний ресурс] // Parrot. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/anafi-thermal-user-guide.pdf>.

24. Порівняння тепловізорних дронів: Anafi Thermal чи Mavic 2 Dual? [Електронний ресурс] // Drone.ua. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://drone.ua/sravnenie-teplovizornyih-dronov-anafi-thermal-ili-mavic-2-dual/>.

25. Квадрокоптер з тепловізором Autel EVO II Dual 640T V3 Rugged Bundle [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://brlab.ru/equipment/enterprise-drones/kvadrokopter-s-teplovizorom-autel-evo-ii-dual-640t-v3-rugged-bundle/>.

26. Глотов В. Розробка методики підвищення точності визначення просторових координат точок об'єктів при аерозніманні з бпла / В. Глотов, М. Фис, О. Пащетник. // ISTCGCAP. – 2020. – С. 45–54.

27. Камера для AUTEL EVO II DUAL (320) [Електронний ресурс] // Wazza. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://wazza.com.ua/ru/products/kamera-dlya-autel-evo-ii-dual-320/>.

28. Галкін С. А. Дослідження алгоритмів порогової обробки зображень

для вирішення задачі виділення об'єкта у послідовності відеокадрів / С. А. Галкін, А. А. Селяєв. // Державний рубрикатор науково-технічної інформації. – 2017. – С. 53–57.

29. Тепловізійні камери. Технічний огляд [Електронний ресурс] // Axis. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.axis.com/dam/public/f7/4a/fb/%D1%82%D0%B5%D0%BF%D0%B%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5-%D0%BA%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D1%80%D1%8B-ru-RU-354255.pdf>.

30. Maistrenko O. V., Burdeinyi M. V., Stehura, S. I., & Stetsiv, S. V. (2020). Визначення координат наземних цілей з використанням малогабаритних БПЛА на основі вдосконаленого псевдодальномірною методу. Військово-технічний збірник, (22), 43–47. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.43-47>

31. Афтаназів І. С., Стоцько Р. З., Шевчук А. О., Строган О. І., Бойко О. О. Визначення координат та параметрів руху безпілотних літальних апаратів. Системи озброєння і військова техніка. 2022. № 3 (71). С. 49-59. <https://doi.org/10.30748/soivt.2022.71.07>.