МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ КІБЕРБЕЗПЕКИ, КОМП'ЮТЕРНОЇ
ТА ПРОГРАМНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
Литвиненко О.Є.
« » 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО СТУПЕНЯ «МАГІСТР»
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 123 «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ»

Тема: «Програмний модуль управління рухом групи дистанційно керованих літальних апаратів»

Виконавець: студент 235М групи Пошивайло Олексій Максимович

Керівник: професор Кучеров Дмитро Павлович

Нормоконтролер: Тупота Євгеній Вікторович

Київ 2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, комп'ютерної та програмної інженерії

Кафедра комп`ютеризованих систем управління

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітньо-професійна програма «Системне програмування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Литвиненко О.Є.

«_____» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Пошивайла Олексія Максимовича

1. Тема дипломної роботи: Програмний модуль управління рухом групи дистанційно керованих літальних апаратів.

затверджена наказом ректора від 27 серпня 2020 р. № 1203/ст.

2. Термін виконання роботи (проекту): з 5 жовтня 2020 по 13 лютого 2020.

3. Вихідні дані до роботи (проекту): Група безпілотних літальних апаратів; бібліотека *Dronecore SDK*, платформа *QGroundControl*.

4. Зміст пояснювальної записки:

1) Розглядається доцільність застосування групи дистанційно керованих апаратів; 2) Розглядаються основні алгоритми керування групою безпілотних літальних апаратів; 3) Створюється програмна реалізація модуля управління рухом групи дистанційно керованих БпЛА та проводиться його подальше тестування;

5. Перелік обов`язкового графічного (ілюстративного) матеріалу:

1) Схема алгоритму програмного модуля управління рухом групи дистанційно керованих БпЛА; 2) Схема алгоритму функції виконання місії БпЛА; 3) Схема

алгоритму функції запуску місії БпЛА; 4) Схема комунікацій компонентів системи з програмним модулем.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розглянути доцільність застосування групи дистанційно керованих апаратів. Підготувати текст для першого розділу пояснювальної записки.	01.08.2020	
2	Розглянути основні алгоритми керування групою безпілотних літальних апаратів;. Підготувати текст другого розділу пояснювальної записки	01.09.2020	
3	Створити програмну реалізацію модуля управління рухом групи БпЛА та провести його тестування. Підготувати текст третього розділу пояснювальної записки.	14.10.2020	
4	Оформитиповний текст пояснювальної записки та необхідні графічні матеріали.	14.11.2019	
5	Підготувати презентацію та текст доповіді для захисту роботи.	14.12.2020	

7. Дата видачі завдання: « 24 » червня 2020 р.

Керівник дипломної роботи _____ Кучеров Д.П.

(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Пошивайло О.М.

(підпис випускника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Програмний модуль управління рухом групи дистанційно керованих літальних апаратів», 80 с., 29 рисунків, 1 додаток, 32 літературних джерела.

Ключові слова: ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ, БЕЗПІЛОТНИК, ГРУППА ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ.

Об’єкт проектування – система автономного керування рухом групи БпЛА з використанням *Dronecode SDK*.

Предмет проектування – програмний модуль управління рухом групи дистанційно керованих літальних апаратів.

Мета дипломного проекту – створення програмованого модуля руху групи дистанційно керованих літальних апаратів.

Метод проектування – створення схеми алгоритмів, розробка програмного коду модуля, тестування програмного модуля.

Результати дипломного проектування рекомендується використовувати для керування рухом групи безпілотних літальних апаратів. У ході роботи над дипломним проектом було створено програмний модуль, який виконує керування рухом групи БпЛА по заданому індивідуальному маршруту.

Прогнозні припущення про подальший розвиток проекту – можливе доповнення системи елементами комп’ютерного зору.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

БпЛА – безпілотний літальний аппарат

БпАС – безпілотна авіаційна система

GPS – *Global Positioning System*

MAVLink – *Micro Air Vehicle Link*

UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*

UAS – *Uunmanned Aircraft System*

DIB – *Drone in a Box*

RAM – *Random Access Memory*

TCP – *Transmission Control Protocol*

UDP – *User Datagram Protocol*

FCB – *Flight Controller Board*

GCS – *Ground Control Station*

DOF – *Degrees Of Freedom*

ВСТУП

У технологічному плані дрон – це безпілотний літак. Безпілотники більш формально відомі як безпілотні літальні апарати (БпЛА) або безпілотні авіаційні системи (БпАС). По суті, безпілотник – це літаючий робот, яким можна дистанційно керувати або здійснювати автономний політ за допомогою програмно керованих планів польотів у своїх вбудованих системах, працюючи разом з бортовими датчиками та *GPS*.

У недалекому минулому БпЛА найчастіше були пов’язані з військовими, де їх спочатку використовували для зенітних цільових практик, збору розвідки, а потім, що суперечливіше, як озброєні платформ. Зараз безпілотники також використовуються в широкому діапазоні цивільних ролей, починаючи від пошуку та порятунку, спостереження, моніторингу дорожнього руху, моніторингу погоди та пожежогасіння, до персональних безпілотників та ділової фотографії на основі безпілотників, а також відеозйомки, сільського господарства та навіть служб доставки.

Перші безпілотні радіокеровані літаки використовувались у Першій світовій війні. У 1918 році армія США розробила експериментальний *Kettering Bug*, безпілотний літак, який ніколи не використовувався в бою.

Перший загальновживаний безпілотник з’явився в 1935 році як повномасштабний переобладнаний біплан *Havilland DH82B "Queen Bee"*, який був оснащений радіо та сервоприводом на задньому сидінні. Літаком можна було звично керувати з переднього сидіння, але, як правило, він летів безпілотним і під час тренувань був обстріляний артилеристами.

У звіті *Wall Street Journal* зазначається, що широкомасштабне використання безпілотників розпочалось у 2006 році, коли Американське митне та прикордонне управління запровадило БпЛА для моніторингу кордону між США та Мексикою.

Наприкінці 2012 року Кріс Андерсон, головний редактор журналу *Wired*, пішов у відставку, щоб присвятити себе своїй безпілотній компанії *3D Robotics, Inc*. Компанія, яка почала спеціалізуватися на особистих безпілотниках-любителях, зараз

продає свої БпЛА компаніям з аерофотозйомки та кіно, будівельним, комунальним та телекомунікаційним компаніям, серед інших компаній.

Наприкінці 2013 року генеральний директор *Amazon* Джефф Безос оголосив про план використання комерційних безпілотників для доставки. У липні 2016 року стартап *Flirtey*, який базується в Рено, успішно доставив пакет жителю Невади використовуючи комерційний безпілотник. Відтоді інші компанії наслідували цей приклад. Наприклад, у вересні 2016 року Віргінський політехнічний інститут розпочали випробування з *Project Wing*, підрозділом власника *Google Alphabet, Inc*, для здійснення доставки, починаючи з бурріто, виготовленого в місцевому ресторані *Chipotle*. Потім у грудні 2016 року *Amazon* доставив свій перший пакет *Prime Air* в Кембридж, Англія. У березні 2017 року він продемонстрував доставку безпілотників *Prime Air* в Каліфорнії.

Керування безпілотників також розширюється; Аеронавігаційний університет *Embry-Riddle* зараз пропонує степінь бакалавра наук у галузі безпілотних систем, магістра в галузі безпілотних повітряних систем.

Хоча безпілотні літальні апарати служать для різних цілей, їх двома основними функціями є політ та навігація.

Для досягнення польоту безпілотники складаються з джерела живлення, такого як акумулятор або паливо, ротори, гвинти та рами. Рама безпілотника зазвичай виготовляється з легких композиційних матеріалів, щоб зменшити вагу та збільшити маневреність під час польоту.

Дронам потрібен контролер, який оператор віддалено використовує для запуску, навігації та посадки. Контролери спілкуються з дроном за допомогою радіохвиль, включаючи *Wi-Fi*.

Навігаційні системи, такі як *GPS*, зазвичай розміщені в носі безпілотника. *GPS* на дроні передає своє точне місце розташування з контролером. Якщо присутній, бортовий висотомір може передавати інформацію про висоту. Висотомір також допомагає утримувати безпілотник на певній висоті, якщо це наказано контролером.

Безпілотники можуть бути оснащені низкою датчиків, включаючи датчики відстані (ультразвукові, лазерні, лідарні), датчики часу прольоту, хімічні датчики та

датчики стабілізації та орієнтації. Візуальні датчики пропонують нерухомі зображення або відеодані, датчики *RGB* збирають стандартні візуальні червоні, зелені та сині довжини хвиль, а мультиспектральні датчики збирають видимі та невидимі довжини хвиль, такі як інфрачервоні та ультрафіолетові. Акселерометри, гіроскопи, магнітометри, барометри та *GPS* – також загальні функції дронів.

РОЗДІЛ 1
ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ГРУПИ ДИСТАНЦІЙНО КЕРОВАНИХ АПАРАТІВ

Технологія безпілотника використовувалась оборонними організаціями та технічно підкованими споживачами вже давно. Однак переваги цієї технології виходять далеко за рамки лише цих секторів.

Зі збільшенням доступності безпілотників багато хто з найбільш небезпечних та високооплачуваних робочих місць у комерційному секторі дозріли для переміщення за допомогою безпілотних технологій. Варіанти використання безпечних, економічно ефективних рішень варіюються від збору даних до доставки. І в міру вдосконалення технологій автономності та запобігання зіткненням, зростає і здатність безпілотників виконувати дедалі складніші завдання.

За даними *PwC*, світовий ринок бізнес-послуг, що формуються на безпілотниках, оцінюється в понад 127 млрд доларів. І оскільки все більше корпорацій прагнуть скористатися цими комерційними можливостями, інвестиції в простір безпілотників зросли.

Дрон або БпЛА (безпілотний літальний апарат), як правило, відноситься до безпілотного літального апарата, який працює за допомогою комбінації технологій, включаючи комп'ютерний зір, штучний інтелект, технологію уникнення об'єктів та інші. Але безпілотники можуть бути також наземними або морськими транспортними засобами, які працюють автономно.

Нижче ми розглянемо способи використання безпілотних технологій в широкому колі галузей.

1.1. Застосування груп БпЛА в військовій сфері

Активний розвиток та викиристання безпілотних літальних апаратів почалося саме у військовій сфері. Станом на 2020 рік сімнадцять країн мають озброєні БпЛА, а понад 100 країн використовують БпЛА у військовій якості. На світовому ринку

військових БпЛА домінують компанії, що базуються в США та Ізраїлі. За кількістю продажів США займали понад 60% частки військового ринку в 2017 році. Чотири з п’яти основних військових виробників БпЛА є американськими, включаючи *General Atomics*, *Lockheed Martin*, *Northrop Grumman* і *Boeing*, за ними слідує китайська компанія *CASC*. Лише США у 2014 році експлуатували понад 9000 військових БпЛА. *General Atomics* є домінуючим виробником лінійки систем *Global Hawk* та *Predator* / *Mariner*.

1.1.1. Застосування БпЛА в бойових діях

Хоча військові безпілотники використовуються вже більше десяти років (БпЛА *Predator* (рис. 1.2) є одним з найбільш відомих), менші портативні безпілотники зараз регулярно використовуються сухопутними військами.

Очікується, що військові витрати на цю технологію зростатимуть як загальний відсоток військових бюджетів, що надаватиме можливість спеціалізованим виробникам безпілотників та розробникам програмного забезпечення. З 2014 року військові витрати США на безпілотні технології зросли з трохи більше 4 млрд доларів до приблизно 9 млрд доларів на рік за даними Центру вивчення безпілотників при Коледжі Барда. За її підрахунками, 95 країн світу вже мають певну форму військової технології безпілотних літальних апаратів порівняно з лише 60 приблизно 10 років тому.

Рис. 1.1. Зліт *Hydra Technologies Ehécatl* для місії спостереження

Багато безпілотників розроблено виключно для спостереження, а інші для наступальних операцій. *Prox Dynamics*, виробник БпЛА військового класу, придбаний *FLIR Systems* у 2016 році, пропонує один із багатьох розвідувальних БпЛА, що використовуються військовими по всьому світу, зокрема морською піхотою США, британською армією, австралійською армією та збройними силами Норвегії.

Рис. 1.2. БпЛА *Predator* під час бойових дій

На додаток до використання нових повітряних технологій, військові продовжують використовувати безпілотні наземні машини для керівництва тактичними ініціативами. Стартап *Clearpath Robotics* виробляє як БпЛА, так і безпілотні наземні транспортні засоби, і в якості клієнтів вказує Міністерство оборони США, армію США та ВМС США.

1.1.2. Використання груп БпЛА для екстреного реагування

Інновації в технологіях камер мали значний вплив на все більше використання дронів. БпЛА, оснащені тепловізійними камерами, забезпечили команди реагування на надзвичайні ситуації ідеальним рішенням для виявлення жертв, яких важко помітити неозброєним оком.

Рис. 1.3. *IAI Heron,* БпЛА, розроблений підрозділом ізраїльської аерокосмічної промисловості

У 2017 році *Land Rover* співпрацює з Австрійським Червоним Хрестом для розробки автомобіля спеціальних операцій із встановленим на даху тепловізійним безпілотником. Автомобіль включає інтегровану систему посадки, яка дозволяє безпілотнику надійно приземлятися на транспортний засіб під час руху. Цей спеціальний *Land Rover Discovery*, який отримав назву «Герой проекту», сподівається врятувати життя, пришвидшивши час відгуку.

Минулого року виробник безпілотників *DJI* запустив програму реагування на надзвичайні ситуації, яка надає першим реагуючим особам доступ до деяких дронів та периферійних пристроїв компанії, а також технічну підтримку та допомогу. Наразі *DJI* співпрацює з пожежними підрозділами в Лос-Анджелесі та Менло-Парку, а також із шерифським управлінням округу Аламеда.

Стартап-компанії та університети також розробляють системи, призначені для пошуку та порятунку. Летальність пропонує стійкий до зіткнення БпЛА, призначений для роботи в обмежених зонах з обмеженими лініями зору – середовища, з якими часто стикаються групи реагування на надзвичайні ситуації.

Крім того, Технологічний університет Делфта випробував безпілотник швидкої допомоги, який може доставляти дефібрилятори на вимогу. Розширюючи існуючу аварійну інфраструктуру, безпілотники зможуть різко збільшити рівень виживання як у сільській, так і в міській місцевості у всьому світі.

1.2. Застосування груп БпЛА в цивільний сфері

Цивільне використання включає обстеження аерокультур, аерофотозйомку, пошук та порятунок, інспекцію ліній електропередач та трубопроводів, підрахунок дикої природи, доставку медичних товарів до недоступних в іншому випадку регіонів та виявлення незаконного полювання, розвідувальних операцій, спільного моніторингу навколишнього середовища, прикордонних патрульних місій, конвою охорона, виявлення та моніторинг лісових пожеж, спостереження, координація гуманітарної допомоги, відстеження шлейфу, зйомка земель, розслідування пожеж та великих аварій, вимірювання зсувів, виявлення незаконних звалищ, будівельна галузь, контрабанда та моніторинг натовпу.

Американські урядові установи використовують БпЛА, такі як *RQ-9 Reaper*, для патрулювання кордонів, розвідки майна та пошуку втікачів. Одними з перших дозволених для побутового використання були *ShadowHawk* в окрузі Монтгомері, штат Техас, спецназ та управління надзвичайних ситуацій.

Приватні громадяни та медіаорганізації використовують БпЛА для спостереження, відпочинку, збору новин або особистої оцінки земель. У лютому 2012 року група захисту прав тварин використовувала гексакоптер *MikroKopter* для зйомки мисливців, які стріляли в голубів у Південній Каролініі. Потім мисливці збили БпЛА. У 2014 році БпЛА було використано для успішного пошуку людини з деменцією, який зник безвісти протягом 3 днів.

1.2.1. Застосування БпЛА у сільскому господарстві

Фермери у всьому світі постійно прагнуть зменшити витрати та збільшити врожайність. Застосовуючи безпілотники, працівники сільського господарства можуть збирати дані, автоматизувати зайві процеси та підвищувати ефективність. Наприклад, *Raptor Maps* – це стартап із сільськогосподарської аналітики, який покладається на дрони, щоб допомогти фермерам краще прогнозувати свій потенційний урожай.

Рис. 1.4. Застосування БпЛА у сільському господарстві

Ще однією областю, де безпілотники набирають тягу, є вирощування сільськогосподарських культур – процес, який може бути повторюваним, трудомістким та орієнтованим на деталі. Щоб допомогти вирішити цю проблему, виробник обладнання *Case IH* створив автономний трактор, тоді як *Abundant Robotics* розробляє рішення для автономного збору продукції. Посадка насіння може бути не менш енергоємним процесом, але такі компанії, як *DroneSeed*, яка залучила 5.1 мільйона доларів від соціального капіталу в 2017 році, прагнуть полегшити це завдання, використовуючи дрони для повітряного розпорошення насіння.

У дослідницьких цілях дрони також використовувались для запилення квітів. Такий підхід колись може виявитись корисним для компенсації зменшення популяції бджіл.

1.2.2. Застосування БпЛА для прогнозування погоди

Вчені використовують нові форми апаратного та програмного забезпечення для збору даних, щоб допомогти вивчити клімат і краще передбачити майбутні зміни в глобальних метеорологічних системах. Сьогодні більшість даних збирається за допомогою стаціонарних конструкцій або фіксується за допомогою геопросторових зображувальних рішень. Проте безпілотники пропонують універсальний варіант, який може фізично дотримуватися погодних моделей у міру їх розвитку.

На додаток до повітряних суден, спосіб збору даних змінюється на безпілотних надводних апаратах на водній основі. *Saildrone* розробив автономний вітрильник, який збирає океанічні та атмосферні дані з поверхні океану.

Пілотний проект *Saildrones*, який виконується у співпраці з Університетом Вашингтонських вчених-атмосферників, зараз діє біля західного узбережжя поблизу району затоки. В рамках дослідження 6 безпілотників компанії самостійно збирають дані біля берега. Вчені, які стоять за проектом, сподіваються, що дані, зібрані безпілотниками, допоможуть зробити прогнози погоди більш точними.

1.2.3. Застосування БпЛА в галузі охорони здоров'я

Сучасна медицина глибоко вплинула на запобігання хворобам, збільшення тривалості життя та підвищення загальних стандартів життя. Однак багато сільських регіонів світу не мають доступу до високоякісних медичних послуг. Хоча медичні витратні матеріали можна доставляти традиційними засобами, певні обставини вимагають швидкого доступу до наркотиків, крові та медичних технологій – необхідність безпілотників.

У 2018 році компанія *WakeMed Health & Hospital* у Північній Кароліні співпрацювала з транспортним департаментом штату в рамках пілотної програми, щоб перевірити практичність використання дронів для доставки медичних пакетів між містечками лікарні.

Після серії успішних випробувань *WakeMed* створив партнерство з каліфорнійським виробником безпілотників *Matternet*, а згодом і з *UPS* для подальшого розвитку зусиль з доставки безпілотників у лікарні.

Однією з добре фінансуваних венчурних медичних компаній є *Zipline International*. Компанія *Zipline*, яка залучила 237 мільйонів доларів у загальному розкритому фінансуванні, пропонує безпілотні літаки для доставки у сільській місцевості по всій Африці. *Flirtey* – ще один стартап у відділенні доставки, який прагне транспортувати ліки.

1.2.4. Застосування БпЛА для гуманітарної допомоги та ліквідація наслідків стихійних лих

На додаток до реагування на надзвичайні ситуації, безпілотники виявилися корисними під час стихійного лиха. Після ураганів та землетрусів БпЛА використовувались для оцінки збитків, визначення місцезнаходження жертв та доставки допомоги. І за певних обставин вони взагалі допомагають запобігти катастрофам. У 2017 році безпілотники використовувались для відновлення живлення районів, пошкоджених ураганом "Харві", а також для обстеження пошкоджень затоплених районів та надання допомоги в пошуково-рятувальних заходах.

Для моніторингу та боротьби з лісовими пожежами використовуються безпілотники спостереження, оснащені тепловізійними камерами, для виявлення ненормальної температури лісу. Роблячи це, команди можуть визначити райони, найбільш схильні до лісових пожеж, або виявити пожежі лише за кілька хвилин після їх початку.

Попит на такий вид технології зростає. У 2019 році Міністерство оборони зробило офіційний запит на безпілотники, які можуть бути розгорнуті під час стихійного лиха для розподілу їжі та води постраждалим районам.

1.2.5. Застосування БпЛА для охорони природи

Браконьєрство та зміна клімату різко впливають на здоров’я дикої природи у всьому світі. За даними Всесвітнього фонду дикої природи, щороку вимирають тисячі видів. Щоб допомогти боротися з цією тенденцією, природоохоронці застосовують інноваційні методи захисту та вивчення наших глобальних екосистем. У поєднанні з геопросторовими зображеннями тепер безпілотники використовуються для спостереження та відстеження тварин.

Команда з Ліверпульської школи природничих наук університету Джона Мура будує автономну систему безпілотників, яка може стежити за зникаючими видами та передавати інформацію про їхній добробут назад дослідникам.

DJI працював у природоохоронному просторі, пропонуючи послуги безпілотних літальних апаратів, щоб допомогти командам проводити дослідження, не порушуючи природних середовищ існування. Океанський альянс – приклад організації, яка використовувала дрони (наприклад, морський *SnotBot*) для збору зразків – зокрема, слизу від китів. Окрім полегшення досліджень екосистем, безпілотники також можуть дозволити природоохоронцям боротися з браконьєрами.

1.2.6. Застосування БпЛА для відстеження хвороб

Відстеження тварин також дозволяє дослідникам відстежувати хвороби. Лондонська школа гігієни та тропічної медицини використовувала дрони з тепловізійними камерами для відстеження руху макак у провінції Палаван на Філіппінах – регіоні, де малярія є активною загрозою.

Можливість стежити за цими тваринами надала подальше розуміння можливого перенесення інфекційної хвороби та її стрибків від тварин до людей. Подібним чином *Microsoft* використовує технологію безпілотних літальних апаратів для захоплення та тестування комарів на інфекційні захворювання. В ідеалі ця інформація може бути використана для захисту місцевих жителів, а в майбутньому може допомогти запобігти епідеміям ще до їх початку.

Ще однією хворобою, з якою борються за допомогою дронів, є шистосомоз – тропічна хвороба, що викликається паразитичними черв’яками. Команда дослідників, що складається з вчених з Університету Вашингтона та Стенфорда, започаткувала експериментальний метод для відстеження поширення та прогнозування передачі шистосомозу. Замість використання тварин, підхід команди використовує безпілотні та супутникові знімки для відстеження присутності "непокорененої, плаваючої рослинності", де равлики, які передають хворобу, проживають у своїх місцях – пошук цих місць за допомогою безпілотних знімків дозволяє тим дослідникам знати, які райони знаходяться вище ризик зараження шистосомозом.

1.2.7. Застосування БпЛА в морському транспорті

Навігація океанами та портами вимагає величезного досвіду та праці від оціночних 1.65 мільйона людей, які сьогодні працюють на міжнародних торгових суднах. Але зі збільшенням обсягу океанічних даних та нововведень в галузі автономії, безпілотні морські машини можуть стати стандартом для морського судноплавства. *Rolls-Royce* вже завершив низку випробувань безпілотних суден, що контролюються дистанційно.

Огляд суден також є важливою частиною галузі. У той час як *Rolls-Royce* планує використовувати менші БпЛА для допомоги в огляді кораблів над поверхнею, стартап Orobotix спроектував підводний безпілотник, який використовується для огляду корпусів знизу.

Безпілотники вже використовуються в таких країнах, як Нідерланди, Данія та Норвегія, для пошуку кораблів, які здійснюють порушення правил викидів. Безпілотні машини можуть виїжджати за милі від порту для виявлення викидів та виявлення правопорушників.

1.2.8. Застосування БпЛА для контролю за відходами

Переробка та біодеградація покращили глобальне управління відходами. Однак нововведення у збиранні відходів все ще з’являються, зокрема безпілотники, які допомагають очистити океани. *RanMarine* керує безпілотним морським транспортним засобом, схожим на *Roomba*, який використовується для збору відходів у портах та гаванях, тоді як *RedZone Robotics* зосереджується на роботах, що використовуються для підтримки систем управління стічними водами.

1.2.9. Застосування БпЛА в енергетичній сфері

Хоча альтернативна енергетика стає все більш популярною, викопне паливо все ще залишається ключовим джерелом енергії у світі. Інспекція інфраструктури, яка використовується для видобутку, переробки та транспортування нафти та газу, є

важливою частиною галузі та часто необхідна для забезпечення відповідності нормам та стандартам.

За допомогою дронів більшу частину цієї інспекційної роботи можна виконати віддалено та безпечно. Використовуючи спеціалізовані термодатчики, деякі безпілотники можуть виявляти витоки швидше, ніж інспектор, тоді як бортові камери з високою роздільною здатністю дозволяють діагностувати деякі проблеми віддалено. *Sky-Futures* пропонує БпЛА для нафтогазової інспекції та використовується багатьма найбільшими світовими нафтовими компаніями для огляду морських бурових установок. Компанія була придбана шотландською компанією з технічного обслуговування *ICR* у 2019 році. *SkyX Systems* використовує безпілотники для оцінки трубопроводів, тоді як *Cyberhawk Innovations* пропонує рішення як для викопного палива, так і для постачальників альтернативної енергії.

Ще одна сфера, де безпілотні літаки показали перспективу – це створення нових майданчиків для виробництва енергії. Дрони, які обстежують райони та збирають топографічні деталі, можуть бути використані для допомоги нафтогазовим компаніям у визначенні нових місць буріння, або вони можуть бути використані сонячними комунальними службами для проектування конфігурацій для нових масивів.

1.2.10. Застосування БпЛА для видобутоку корисних копалин

Видобуток корисних копалин вимагає постійного вимірювання та оцінки фізичного матеріалу. Запаси руди, гірських порід або мінералів важко виміряти. Але за допомогою унікальних камер безпілотники можуть фіксувати об’ємні дані про запаси та обстежувати гірничі роботи з повітря. Це зменшує ризики, пов’язані з тим, що геодезисти знаходяться на місцях.

Airobotics, яка залучила більше 90 мільйонів доларів США за рахунок розкритого власного фінансування, забезпечує безпілотне рішення на місці, яке використовується гірничодобувними компаніями для вимірювання матеріалів, геодезичних операцій та підвищення безпеки. Система повністю автономна і зберігається в корпусі на місці, який може автономно міняти камери та батареї.

Видобуток також порушується автономними транспортними засобами, такими як безпілотний наземний транспортний засіб, розроблений *Komatsu*.

1.2.11. Застосування БпЛА для планування будівництва

Одним із найпоширеніших випадків комерційного використання дронів є планування та управління будівництвом. Розробники програмного забезпечення створили рішення, які аналізують хід будівництва за допомогою регулярно фіксованих даних. Незважаючи на те, що наземне обстеження все ще залишається важливою частиною планування та моніторингу будівництва, використання даних безпілотників стає все більш важливим.

Технологія камери використовується для спостереження за будівлями та вимірювання топографії та типу грунту протягом усього життєвого циклу будівництва. *Skycatch* пропонує ці послуги в щомісячній передплаті на програмне забезпечення, призначене для створення пари з безліччю БпЛА. *Dronomy* пропонує подібний набір програмного забезпечення, яке допомагає безпілотникам покращувати моніторинг проектів та управління сайтами.

1.2.12. Застосування БпЛА для розвитоку інфраструктури

Незважаючи на те, що безпілотні літаки служать корисній меті при плануванні та управлінні будівництвом, вони також можуть використовуватись для розвитку фізичної інфраструктури.

ETH Zürich, видатний університет Швейцарії, співпрацює з робототехніком Раффаелло Д’Андреа та архітектурною фірмою *Gramazio Kohler Architects*, щоб створити споруду, повністю побудовану БпЛА.

Програмуючи безпілотники піднімати і складати тисячі полімерних цеглин, команда змогла створити геометричну структуру висотою майже 10 метрів. Готовий продукт служить концепцією "вертикального міста", яке використовувало б подібну структуру, яка будувалася б більшими безпілотниками.

Міністерство транспорту Міннесоти розпочало вивчення потенціалу безпілотників, щоб зробити роботу департаменту більш ефективною, і виявило, що використання безпілотників для інспекцій державної інфраструктури допомогло державі заощадити близько 40% на пов'язаних з цим витратах.

До 2018 року близько 80% державних департаментів транспорту використовували безпілотники, згідно з опитуванням, проведеним Американською асоціацією державних службовців шосе та транспорту. Використання включає моніторинг прогресу проектів будівництва автомобільних доріг, обстеження нових об'єктів, огляд мостів, реагування на надзвичайні ситуації тощо.

1.2.13. Застосування БпЛА в сфері страхування

Страхові інспекції – це основна сфера, де страхові компанії можуть використовувати дрони. Традиційно інспектори та оцінювачі майнового страхування масштабують структури для проведення ручних перевірок майна, але зараз безпілотники можуть надавати детальну оцінку за допомогою камер високої роздільної здатності.

Хоча пошкоджене або дефектне майно все ще вимагає уваги фізичного огляду, БпЛА також починають справляти вплив там.

Серед бездротових компаній, орієнтованих на страхову галузь, є *Kespry*, яка пропонує такі послуги, як перевірка даху для претензій та співпрацює з *Farmers Insurance* для масштабування своїх пропозицій у страховому просторі.

1.2.14. Застосування БпЛА в сфері нерухомості

Дрони були корисними для зйомки цінних властивостей, показуючи, що навіть галузь нерухомості може використовувати технологію безпілотників. До 2016 року вже повідомлялося, що нерухомість вже є однією з найактивніших галузей, коли мова заходила про впровадження безпілотної технології.

DroneBase – це одна компанія, яка пропонує фотографії безпілотників на замовлення для цілого ряду різних галузей, включаючи житлову та комерційну нерухомість.

Незважаючи на те, що недорогі аерофотознімки використовуються для зйомки екстер'єру об'єкта, інтер'єри будинків також фіксуються невеликими, спритними БпЛА. *Zaw Studios*, медіа-компанія, що базується за межами Лос-Анджелеса, використовує дрони для зйомки захоплюючих 360-градусних фотографій та відео у великих будинках. Готовий продукт надає потенційним покупцям перспективу, яка імітує фізичний прохід.

Для забудовників нерухомості безпілотні літальні апарати можуть бути корисним інструментом для розуміння того, як краще обладнати нерухомість видом, зручностями та особливостями. Швидке сканування об'єкта з усіх кутів може забезпечити кращу здатність спроектувати структуру для ландшафту, в якому воно знаходиться.

1.2.15. Застосування БпЛА в міському плануванні

У міру продовження урбанізації містам доводиться пристосовуватися до більшої кількості населення та хронічних заторів. Міське планування набуває все більшого значення для міст, але вимагає глибокого розуміння столичних ритмів та потоків. Використовуючи безпілотники, містобудівники можуть краще зрозуміти своє середовище та впровадити вдосконалення, керовані даними.

Інженерна консалтингова фірма *Arup* використовувала безпілотники для збору даних у густонаселених районах. Оскільки багато муніципалітетів працюють з обмеженим бюджетом, безпілотники можуть забезпечити відносно недорогий спосіб отримання безцінних міських даних. Наприклад, безпілотники допомогли містобудівникам визначити, які території можуть отримати вигоду від зелених насаджень.

Сьогодні машинне навчання допомагає зробити більш складні процеси картографування за меншими витратами. У Беніні Бенінська літаюча лабораторія

використовувала безпілотники для створення щільної аерокарти міста Дасса, а потім застосувала технологію машинного навчання для класифікації різних типів структур і регіонів на карті – процес, який зайняв би значну кількість часу та праці без програмного забезпечення.

1.2.16. Застосування БпЛА для перевезення пасажирів

Хоча наше визначення дронів, як правило, обмежене безпілотними транспортними засобами, деякі нові форми автономного транспортування функціонують подібно до безпілотників. Наприклад, китайський *EHANG*, який минулого року став публічним, створив автономний літальний апарат (*AAV*), який працює з 4 роторами (квадрокоптер) для вертикального зльоту. Автомобіль призначений для перевезення пасажирів між пунктами призначення, навіть у міському середовищі з великою кількістю перешкод. *AAV* вимагає мінімальної кількості пасажирів і включає вбудовані системи, які прагнуть забезпечити безпечну посадку в разі відмови двигуна або зіткнення.

Рис. 1.5. БпЛА *EHang 184* для пасажирских перевезень

Тим часом *Lilium Aviation* – це стартап, який прагне побудувати автономний літальний апарат для пасажирських перевезень, що використовує конструкцію, більш подібну до *Harrier Jet*, ніж типовий безпілотник.

Чинні люди також роблять рухи в просторі. *Uber*, *Airbus*, *Boeing* та *Rolls-Royce* – це 4 великі транспортні компанії, які працюють над розробкою власних автономних літаючих безпілотників для переправлення пасажирів.

Готуючись до світу роботи, подібної до безпілотників, інвестори по всьому світу вже купують майданчики з площею та правами на повітря, необхідні для того, щоб служити потенційними «вертипортами», місцями для висадки *AAB*, відсутність яких може уповільнити розповсюдження ці машини по всьому світу.

1.2.17. Застосування БпЛА в авіакомпаніях

Виконання вимог є проблемою для багатьох галузей, але авіакомпанія повинна дотримуватися особливо жорстких рівнів нормативних стандартів. Інспекції *FAA* різняться між собою, але базові інспекції проводяться через кожні 125 годин польоту. Крім того, від авіакомпаній передбачається проводити власні планові перевірки перед кожним рейсом.

Рис. 1.6. Використання дронів для автоматизації перевірок в українських авіалініях

Намагаючись вдосконалити цей процес, *Intel* співпрацює з *Airbus* для проведення зовнішніх інспекцій літаків з БпЛА. Intel поставив безпілотники, оснащені камерами, які дозволяють їм збирати зображення та дані, які можуть бути використані для створення детальних 3D-моделей флоту *Airbus*.

Airbus також запустив власну дочірню компанію безпілотників *Airbus Aerial*, яка прагне надавати інспекційні послуги в різних галузях. Тим часом *Canard Drones* – це стартап, який прагне надати інспекційні рішення для аеропортів, а не літаків.

1.2.18. Застосування БпЛА в галузі розваг

Безпілотники вже вплинули на спостереження за подіями та фотографії / фільми подій, але також використовуються більш безпосередньо для розваги. Дісней був однією з найбільш активних компаній у цьому просторі і подав заявку на низку патентів на безпілотники, зосереджені на розвагах. Синхронізовані світлові шоу, плавучі проекційні екрани та лялечники безпілотних літальних апаратів – все це вважалося розважальним гігантом. *Verge Aero* – це один із прикладів приватного програвача, який створює живі синхронізовані вистави безпілотних літальних апаратів для аудиторії.

Рис. 1.7. Зображення, створене групою БпЛА

На новій виставці *Universal Studios* «Чарівний світ Гаррі Поттера» шоу, яке складається із безпілотників, освітлених світлодіодами, та складних проекцій завершує шоу «Темні мистецтва в замку Хогвартс». Використовуючи технологію *Intel Shooting Star*, яка також була використана під час перерви шоу *Super Bowl* 2019 року

та під час зимових Олімпійських ігор 2018 року, безпілотники можуть бути запрограмовані на відображення ряду шаблонів та синхронізацію з музикою та іншими елементами живого виступу.

1.2.19. Застосування БпЛА в галузі кінематографу

Однією з перших галузей промисловості, яка взяла на озброєння безпілотники, була професійна плівка. Безпілотники дозволили режисерам знімати драматичні повітряні перспективи без використання вертольотів. Це суттєво вплинуло на суть Голлівуду, розширивши межі кінематографії. По мірі того, як впровадження цієї технології зростало, Федеральна авіаційна адміністрація та Американська асоціація кінофільмів спільно працювали над створенням процедур регулювання комерційного використання безпілотників у космосі.

Рис. 1.8. Використання БпЛА для створення документальних фільмів у Того

Aerial MOB використовував дрони для зйомки вмісту для таких фільмів, як *The Circle*, "Вартові Галактики" та *La La Land*, серед інших. Він також використовував безпілотники для зйомки різноманітних рекламних оголошень.

XM2 Cine Sierra, з максимальним корисним навантаженням 65 фунтів, є одним з найбільших безпілотників, розроблених спеціально для кінематографії. Він знайшов

широке застосування у великобюджетних голлівудських картинах, включаючи такі фільми, як Зоряні війни Епізод IX.

Також триває робота над розробкою безпілотників, які можуть знімати без необхідності активного керівництва людини. Дослідники з Університету Карнегі-Меллона експериментують з автономним програмним забезпеченням для безпілотників, яке має на меті дозволити дрону самостійно утримуватися на плаву, слідувати за людською фігурою через складне середовище та виконувати різні вказівки щодо блокування та відстеження.

1.2.20. Застосування БпЛА в галузі реклами

На додаток до зйомок реклами, безпілотники використовуються як фізичні носії для маркетингу. Вони можуть забезпечити повітряну рекламу на прямих заходах або місцях з великим трафіком. *DroneCast*, наприклад, розробив послуги з банерної реклами та доставляв патронам на автомобільних з'їздах брендів марки *Ford*.

Рис. 1.9. Використання БпЛА в галузі реклами

1.2.21. Застосування БпЛА в журналістиці та у висвітленні новин

Інформаційні бюлетені використовують дрони, щоб додати контексту та розуміння новин, підвищити цінність виробництва та покращити документальний розповідь.

З тих пір, як правила *FAA* змінились, щоб дозволити журналістам використовувати безпілотники для збору новин, компанія *McClatchly*, що базується в Сакраменто, яка керує місцевими медіа–брендами в США, навчила більше 50 співробітників користуватися безпілотниками.

Пізніше безпілотники використовувались для отримання повітряних кадрів наслідків урагану "Ірма" журналістами "*Miami Herald*", для зйомок пожеж в Каліфорнії та для оцінки районів, що охоплені повенями на Середньому Заході.

CNN має велику програму безпілотників під назвою *CNN Air*. Мережа повідомляє про сотні місій у понад 20 країнах. Кадри, зібрані його флотом безпілотників, вносять вклад в основний звіт новин *CNN*, ініціативу *Great Big Story* (присвячену створенню мікродокументальних та короткометражних фільмів) та інші проекти.

Рис. 1.10. Дрон компанії *CNN*

За допомогою безпілотників екіпаж може збирати кадри, які важко отримати в іншому випадку через проблеми з безпекою, великі витрати або фізичні бар’єри. Старший директор національних новинних технологій та аерофотознімків та репортажів *CNN* Грег Агвент пояснює, що безпілотники дозволяють командам "захоплювати речі, яких ви просто не можете захопити з вертольота, що створить набагато більше шуму і обійдеться вам у набагато більше грошей".

1.3. Висновки до розділу

В першому розділі дипломної роботи було проведено дослідження актуальності застосування груп безпілотних літальних апаратів. Після ознайомлення зі всіма матеріалами можна зробити висновки, що дрони, які також називаються безпілотними літальними апаратами (БпЛА), не мають на борту людського пілота, і натомість вони або управляються людиною на землі, або автономно за допомогою комп'ютерної програми. БпЛА стають все більш популярними не лише для військових цілей, але й для багатьох інших сфер, починаючи від досліджень дикої природи та атмосфери, закінчуючи ліквідацією наслідків стихійних лих та спортивною фотографією. Безпілотники стають очима та вухами вчених, обстежуючи місце для археологічних розкопок, ознак незаконного полювання та пошкодження врожаю, і навіть знаходячись всередині ураганів для вивчення диких штормів.

На багатьох безпілотних літальних апаратах є такі особливості:

– Конструкція квадрокоптера: Ця конструкція використовує чотири вертолітних ротора або гвинти для забезпечення контролю підйому та напрямку.
– Виділений контролер: ці пристрої використовують радіосигнали для передачі команд на безпілотник, і, як правило, живляться від акумуляторних батарей.
– Акумуляторні батареї: є знімними та заряджаються за допомогою адаптера, який підключається до електричної розетки, як порт *USB* або настінна розетка.
– Додаткові гвинти: навіть найдорожчі безпілотники часто поставляються з одним або декількома повними комплектами змінних гвинтів.
– Система управління польотом.
– Мінімальний захист від води: електроніка в більшості споживчих безпілотних літальних апаратів та їх контролерів безпілотних літальних апаратів не захищена від пошкодження водою, тому переліт ними в дощові умови може призвести до серйозних електричних проблем.

Враховуючи всі зазначені факти, можна стверджувати, що сфера дронів є досить перспективною, тому реалізацію програмного модуля руху групи дистанційно керованих літальних апаратів можна вважати доцільною.

РОЗДІЛ 2
АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ ГРУПОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

2.1. Мурашиний алгоритм групового керування БпЛА

В інформатиці та дослідженні операцій алгоритм оптимізації колонії мурашок (*ACO*) – це імовірнісний прийом для вирішення обчислювальних задач, який можна звести до пошуку хороших шляхів за допомогою графіків. Штучні мурахи позначають мультиагентні методи, натхненні поведінкою справжніх мурах. Зв'язок біологічних мурах на основі феромонів часто є переважною використовуваною парадигмою. Поєднання штучних мурах та алгоритми локального пошуку стали методом вибору для численних завдань оптимізації, що включають певний графік, наприклад, маршрутизацію транспортних засобів та маршрутизацію в Інтернеті. Бурхлива діяльність у цій галузі призвела до проведення конференцій, присвячених виключно штучним мурахам, та численних комерційних заявок спеціалізованих компаній, таких як *AntOptima*.

Як приклад, оптимізація колонії мурашок – це клас алгоритмів оптимізації, змодельований на основі дії колонії мурах. Штучні "мурахи" (наприклад, імітаційні агенти) знаходять оптимальні рішення, рухаючись по простору параметрів, що представляє всі можливі рішення. Справжні мурахи відкладають феромони, спрямовуючи один одного на ресурси, досліджуючи навколишнє середовище. Модельовані «мурахи» аналогічним чином фіксують свої позиції та якість своїх рішень, так що в подальших ітераціях моделювання більше мурашок знаходить кращі рішення. Одним із варіантів цього підходу є алгоритм бджіл, який є більш аналогічним шаблонам пошуку медоносної бджоли, іншої соціальної комахи.

Цей алгоритм є членом сімейства алгоритмів колонії мурашок у методах ройового інтелекту, і він являє собою деякі метаевристичні оптимізації. Спочатку запропонований Марко Доріго в 1992 р. В кандидатській дисертації, перший алгоритм

мав на меті пошук оптимального шляху в графіку, заснованого на поведінці мурашок, які шукають шлях між своєю колонією та джерелом їжі. З тих пір оригінальна ідея урізноманітнилася для вирішення ширшого класу числових задач, і в результаті виникло декілька проблем, що спираються на різні аспекти поведінки мурах. З більш широкої точки зору, *ACO* виконує пошук на основі моделі та поділяє певну схожість з оцінкою алгоритмів розподілу.

У природному світі мурахи деяких видів (спочатку) блукають хаотично, і, знайшовши їжу, вони повертаються до своєї колонії, прокладаючи феромонові стежки. Якщо інші мурахи знайдуть такий шлях, вони, швидше за все, не продовжуватимуть мандрувати навмання, а натомість йти слідом, повертаючись і підсилюючи його, якщо врешті знайдуть їжу.

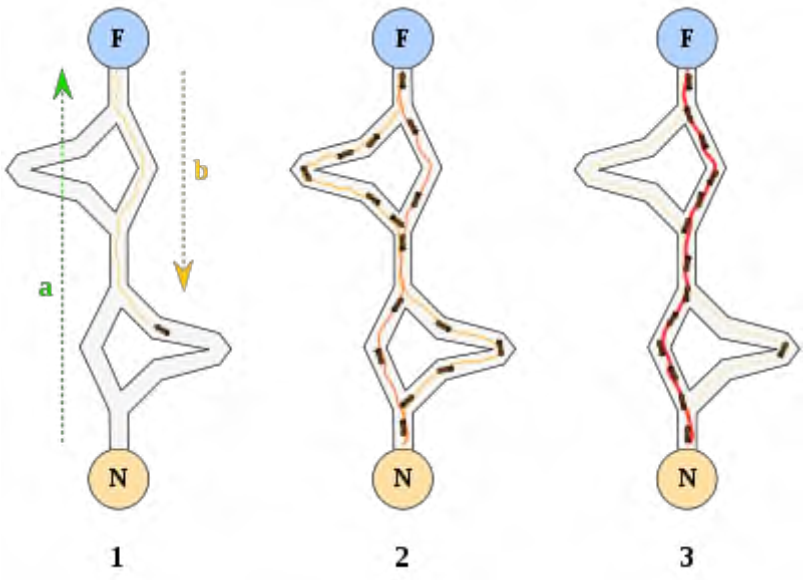

Рис. 2.1. Пошук мурахами найкоротшого шляху

Однак з часом феромоновий слід починає випаровуватися, зменшуючи тим самим свою привабливу міцність. Чим більше часу потрібно, щоб мураха пройшов шлях і назад, тим більше часу феромонам доведеться випаровуватися. Для порівняння короткий шлях проходить частіше, і, отже, щільність феромонів стає вищою на коротших шляхах, ніж довші. Випаровування феромонів також має ту перевагу, що дозволяє уникнути конвергенції до локально оптимального рішення. Якби взагалі не

було випаровування, шляхи, обрані першими мурахами, як правило, були б надмірно привабливими для наступних. У цьому випадку дослідження простору рішень було б обмеженим. Вплив випаровування феромонів у реальних мурашиних системах незрозумілий, але він дуже важливий у штучних системах.

Загальний результат полягає в тому, що коли один мураха знаходить хороший (тобто короткий) шлях від колонії до джерела їжі, інші мурахи, швидше за все, йдуть цим шляхом, і позитивні відгуки в кінцевому підсумку призводять до того, що багато мурах ідуть по одному шляху. Ідея алгоритму колонії мурашок полягає в імітації такої поведінки за допомогою "імітованих мурах", що обходять графік, що представляє проблему для вирішення.

2.1.1. Навколишні мережі інтелектуальних об’єктів

Потрібні нові концепції, оскільки “інтелект” більше не централізований, але його можна знайти у всіх незначних об’єктах. Відомо, що антропоцентричні концепції ведуть до створення систем, в яких централізована обробка даних, блоки управління та обчислювальні сили. Ці централізовані підрозділи постійно підвищували свою продуктивність і їх можна порівняти з людським мозку. Модель мозку стала найвищим баченням комп’ютерів. Навколишні мережі інтелектуальних об’єктів і, рано чи пізно, нове покоління інформаційних систем, які ще більш розсіяні та базуються на нанотехнологіях, глибоко змінять цю концепцію. Невеликі пристрої, які можна порівняти з комахами, самі по собі не мають високого інтелекту. Дійсно, їх інтелект можна класифікувати як досить обмежений. Наприклад, неможливо інтегрувати високопродуктивний калькулятор з можливістю вирішити будь-яку математичну проблему в біочіп, який імплантується в організм людини або інтегрується в інтелектуальну мітку, призначену для відстеження комерційних статей. Однак, як тільки ці об’єкти взаємопов’язані, вони розпоряджаються формою інтелекту, яку можна порівняти з колонією мурах або бджіл. У разі певних проблем цей тип інтелекту може перевершувати міркування централізованої системи, подібної до мозку.

Природа пропонує кілька прикладів того, як незначні організми, якщо всі вони дотримуються одного і того ж основного правила, можуть створити форму колективного інтелекту на макроскопічному рівні. Колонії соціальних комах чудово ілюструють цю модель, яка значно відрізняється від людських суспільств. Ця модель базується на співпраці незалежних підрозділів з простою та непередбачуваною поведінкою. Вони пересуваються навколишньою територією для виконання певних завдань і мають лише дуже обмежену кількість інформації для цього. Наприклад, колонія мурах представляє численні якості, які також можна застосувати до мережі навколишніх об'єктів. Колонії мурах мають дуже високу здатність пристосовуватися до змін у навколишньому середовищі, а також надзвичайно сильні у вирішенні ситуацій, коли одна особа не виконує певне завдання. Така гнучкість також була б дуже корисною для мобільних мереж об'єктів, які постійно розвиваються. Пакети інформації, які переходять від комп'ютера до цифрового об'єкта, поводяться так само, як і мурахи. Вони рухаються по мережі і переходять від одного вузла до іншого з метою якомога швидшого прибуття до кінцевого пункту призначення.

2.1.2. Штучна феромонна система

Зв'язок на основі феромонів – один із найефективніших способів спілкування, який широко спостерігається в природі. Феромон використовується соціальними комахами, такими як бджоли, мурахи та терміти; як для взаємодії між агентами, так і між агентами та роєм. Завдяки своїй здійсненності штучні феромони були застосовані в робототехнічних системах із кількома роботами та роями. Зв'язок на основі феромонів реалізовувався різними засобами, такими як хімічні або фізичні (*RFID*-мітки, світло, звук) способи. Однак ці реалізації не змогли відтворити всі аспекти феромонів, як це спостерігається в природі.

Використання проектованого світла було представлено в статті *IEEE* 2007 року Гарньє, Саймон та ін. як експериментальна установка для вивчення зв'язку на основі феромонів з мікроавтономними роботами. Інше дослідження, яке запропонувало новий метод феромонного зв'язку, *COSF* для роботизованої системи роїв, засноване на точній та швидкій візуальній локалізації. Система дозволяє моделювати практично

необмежену кількість різних феромонів і забезпечує результат їх взаємодії у вигляді зображення в масштабі сірого на горизонтальному РК-екрані, на якому рухаються роботи. Для демонстрації феромонного методу зв'язку автономний мікроробот *Colias* був розгорнутий як робоча платформа для роїв.

2.2. Генетичний алгоритм для групового керування БпЛА

У генетичному алгоритмі сукупність рішень-кандидатів (які називаються особинами, істотами чи фенотипами) проблеми оптимізації еволюціонує до кращих рішень. Кожен розчин-кандидат має набір властивостей (його хромосом або генотипу), які можуть бути мутовані та змінені; традиційно рішення представляються у бінарному вигляді як рядки *0s* та *1s*, але можливі й інші кодування.

Еволюція, як правило, починається з популяції випадково сформованих особин, і є ітераційним процесом, причому популяція в кожній ітерації називається поколінням. У кожному поколінні оцінюється підготовленість кожної особини в популяції; придатність – це, як правило, значення цільової функції у вирішуваній задачі оптимізації. Більш придатних особин стохастично відбирають із поточної популяції, і геном кожної особини модифікується (рекомбінується і, можливо, випадково мутується), щоб сформувати нове покоління. Потім нове покоління рішень-кандидатів використовується в наступній ітерації алгоритму. Як правило, алгоритм припиняється, коли було створено максимальну кількість поколінь або досягнуто задовільного рівня придатності для населення.

Стандартне представлення кожного рішення-кандидата є масивом бітів. Масиви інших типів та структур можуть використовуватися по суті таким же чином. Основна властивість, що робить ці генетичні уявлення зручними, полягає в тому, що їх частини легко вирівнюються завдяки фіксованому розміру, що полегшує прості операції кросоверу. Також можуть використовуватися подання змінної довжини, але реалізація кросовера в цьому випадку є більш складною. Деревоподібні уявлення досліджуються в генетичному програмуванні, а графічні уявлення – в еволюційному

програмуванні; суміш як лінійних хромосом, так і дерев досліджується при програмуванні експресії генів.

Після того, як генетичне уявлення та функція придатності визначені, *GA* приступає до ініціалізації сукупності рішень, а потім до вдосконалення її шляхом повторного застосування операторів мутації, кросинговеру, інверсії та відбору.

2.2.1. Ініціалізація та відбір в генетичному алгоритмі

Чисельність населення залежить від характеру проблеми, але, як правило, містить кілька сотень або тисяч можливих рішень. Часто початкова сукупність генерується випадковим чином, дозволяючи весь спектр можливих рішень (простір пошуку). Іноді рішення можуть бути «засіяні» в районах, де, ймовірно, будуть знайдені оптимальні рішення.

Протягом кожного наступного покоління відбирається частина існуючої популяції для виведення нового покоління. Індивідуальні рішення вибираються за допомогою фітнес-процесу, де, як правило, частіше обираються фітнес-рішення (вимірювані функцією фітнесу). Деякі методи відбору оцінюють придатність кожного рішення та переважно вибирають найкращі рішення. Інші методи оцінюють лише випадкову вибірку сукупності, оскільки попередній процес може зайняти багато часу.

Функція придатності визначається за генетичним уявленням і вимірює якість представленого розчину. Функція фітнесу завжди залежить від проблем. Наприклад, у проблемі рюкзака хочеться максимізувати загальну вартість об’єктів, які можна покласти в рюкзак певної фіксованої місткості. Представлення рішення може бути масивом бітів, де кожен біт представляє інший об’єкт, а значення біта (0 або 1) вказує, чи знаходиться об’єкт у ранці. Не кожне таке подання є дійсним, оскільки розмір предметів може перевищувати місткість рюкзака. Придатність рішення – це сума значень усіх об’єктів у рюкзаку, якщо подання є дійсним, або 0 в іншому випадку.

У деяких проблемах важко або навіть неможливо визначити вираз фізичної форми; у цих випадках може використовуватися моделювання для визначення значення функції придатності фенотипу (наприклад, обчислювальна динаміка рідини використовується для визначення опору повітря транспортного засобу, форма якого

закодована як фенотип), або навіть використовуються інтерактивні генетичні алгоритми.

2.2.2. Ініціалізація та відбір в генетичному алгоритмі

Чисельність населення залежить від характеру проблеми, але, як правило, містить кілька сотень або тисяч можливих рішень. Часто початкова сукупність генерується випадковим чином, дозволяючи весь спектр можливих рішень (простір пошуку). Іноді рішення можуть бути «засіяні» в районах, де, ймовірно, будуть знайдені оптимальні рішення.

Протягом кожного наступного покоління відбирається частина існуючої популяції для виведення нового покоління. Індивідуальні рішення вибираються за допомогою фітнес-процесу, де, як правило, частіше обираються фітнес-рішення (вимірювані функцією фітнесу). Деякі методи відбору оцінюють придатність кожного рішення та переважно вибирають найкращі рішення. Інші методи оцінюють лише випадкову вибірку сукупності, оскільки попередній процес може зайняти багато часу.

Функція придатності визначається за генетичним уявленням і вимірює якість представленого розчину. Функція фітнесу завжди залежить від проблем. Наприклад, у проблемі рюкзака хочеться максимізувати загальну вартість об’єктів, які можна покласти в рюкзак певної фіксованої місткості. Представлення рішення може бути масивом бітів, де кожен біт представляє інший об’єкт, а значення біта (0 або 1) вказує, чи знаходиться об’єкт у ранці. Не кожне таке подання є дійсним, оскільки розмір предметів може перевищувати місткість рюкзака. Придатність рішення – це сума значень усіх об’єктів у рюкзаку, якщо подання є дійсним, або 0 в іншому випадку.

У деяких проблемах важко або навіть неможливо визначити вираз фізичної форми; у цих випадках може використовуватися моделювання для визначення значення функції придатності фенотипу (наприклад, обчислювальна динаміка рідини використовується для визначення опору повітря транспортного засобу, форма якого закодована як фенотип), або навіть використовуються інтерактивні генетичні алгоритми.

2.2.2. Генетичні оператори

Наступним кроком є створення генерації сукупності рішень другого покоління з тих, що були відібрані за допомогою комбінації генетичних операторів: кросинговер (також званий рекомбінацією) та мутація.

Для кожного нового рішення, яке буде вироблено, для розведення відбирається пара "батьківських" розчинів з пулу, обраного раніше. Виробляючи "дочірнє" рішення, використовуючи вищезазначені методи кросинговеру та мутації, створюється нове рішення, яке зазвичай поділяє багато характеристик своїх "батьків". Для кожної нової дитини відбираються нові батьки, і процес триває доти, доки не буде сформовано нову сукупність рішень відповідного розміру. Хоча методи розмноження, засновані на використанні двох батьків, є більш "натхненними біологією", деякі дослідження припускають, що більше двох "батьків" генерують хромосоми вищої якості.

Зрештою ці процеси призводять до популяції хромосом наступного покоління, яка відрізняється від початкової генерації. Як правило, середня придатність зросте за цією процедурою для популяції, оскільки для розведення відбираються лише найкращі організми першого покоління, а також невелика частка менш придатних розчинів. Ці менш придатні рішення забезпечують генетичне різноманіття в генетичному пулі батьків і, отже, забезпечують генетичне різноманіття наступного покоління дітей.

Думка розділена щодо важливості кросинговеру проти мутації. У *Fogel* (2006) є багато посилань, які підтверджують важливість мутаційного пошуку.

Хоча кросинговер та мутація відомі як основні генетичні оператори, можна використовувати інші оператори, такі як перегрупування, колонізація-вимирання або міграція в генетичних алгоритмах.

Варто налаштувати такі параметри, як імовірність мутації, ймовірність кросоверу та розмір популяції, щоб знайти розумні настройки для класу проблеми, над яким працює Дуже невеликий рівень мутації може призвести до генетичного дрейфу (який не є ергодичним за своєю суттю). Зависокий рівень рекомбінації може призвести до передчасного зближення генетичного алгоритму. Зависокий рівень

мутації може призвести до втрати хороших рішень, якщо не застосовувати елітарний відбір. Адекватний розмір популяції забезпечує достатнє генетичне різноманіття для даної проблеми, але може призвести до втрати обчислювальних ресурсів, якщо встановити значення більше, ніж потрібно.

На додаток до основних операторів, наведених вище, можуть бути використані інші евристики, щоб зробити обчислення швидшим або надійнішим. Евристика видоутворення карає перетин між занадто схожими рішеннями-кандидатами; це заохочує різноманітність населення та допомагає запобігти передчасному зближенню до менш оптимального рішення.

2.2.3. Завершення алгоритму

Цей процес поколінь повторюється до досягнення умови припинення. Загальними умовами припинення є:

- Знайдено рішення, яке відповідає мінімальним критеріям
- Досягнуто фіксовану кількість поколінь
- Досягнуто розподіленого бюджету (час обчислення / гроші)
- Придатність найвищого рейтингу досягає або досягла плато настільки, що послідовні ітерації більше не дають кращих результатів
- Ручний огляд
- Поєднання вищезазначеного

2.3. Алгоритм імітації відпалу

Імітований відпал (*SA*) – це імовірнісний прийом для наближення глобального оптимуму даної функції. Зокрема, метаевристично наблизити глобальну оптимізацію у великому просторі пошуку для проблеми оптимізації. Він часто використовується, коли пошуковий простір є дискретним (наприклад, проблема продавця). Для проблем, де пошук приблизного глобального оптимуму важливіший, ніж пошук точного локального оптимуму за встановлений проміжок часу, імітаційний відпал може бути

кращим перед точними алгоритмами, такими як градієнтний спуск, відгалуження та обмеження.

Назва алгоритму походить від відпалу в металургії – техніки, що передбачає нагрівання та контрольоване охолодження матеріалу для збільшення розмірів його кристалів та зменшення їх дефектів. Обидва вони є атрибутами матеріалу, які залежать від їх вільної термодинамічної енергії. Нагрівання та охолодження матеріалу впливає як на температуру, так і на термодинамічну вільну енергію або енергію Гіббса. Модельований відпал може бути використаний для дуже складних обчислювальних задач оптимізації, коли точні алгоритми не працюють; навіть незважаючи на те, що зазвичай досягається наближене рішення до загального мінімуму, цього може бути достатньо для багатьох практичних проблем.

Наразі проблеми, які розв’язує *SA*, формулюються цільовою функцією багатьох змінних, з урахуванням кількох обмежень. На практиці обмеження може бути покарано як частина цільової функції.

Подібні методи неодноразово запроваджувались, включаючи Пінкуса (1970), Хачатуряна (1979), Кіркпатріка, Желатта та Веккі (1983) та Черні (1985). У 1983 році цей підхід застосували Кіркпатрік, Желатт Молодший, Веккі, для вирішення проблеми комерційного продавця. Вони також запропонували його нинішню назву, змодельований відпал.

Це поняття повільного охолодження, реалізоване в модельованому алгоритмі відпалу, інтерпретується як повільне зменшення ймовірності прийняття гірших рішень при дослідженні простору рішень. Прийняття гірших рішень дозволяє більш широкий пошук глобального оптимального рішення. Загалом, імітовані алгоритми відпалу працюють наступним чином. Температура поступово знижується від початкового позитивного значення до нуля. На кожному часовому кроці алгоритм випадковим чином вибирає рішення, близьке до поточного, вимірює його якість і рухається до нього відповідно до температурно-залежних ймовірностей вибору кращих чи гірших рішень, які під час пошуку відповідно залишаються на 1 і зменшуватися до нуля.

Моделювання може бути виконане або рішенням кінетичних рівнянь для функцій щільності, або за допомогою методу стохастичної вибірки. Метод є адаптацією алгоритму Метрополіс-Гастінгс, методу Монте-Карло для генерування зразкових станів термодинамічної системи, опублікованого *H. Metropolis* у 1953 році.

2.3.1. Базові ітерації алгоритму імітації відпалу

На кожному кроці модельована евристика відпалу враховує деякі сусідні стани *S** поточного стану *s* і, ймовірно, приймає рішення між переміщенням системи в стан *S** або перебуванням у стані *s*. Ці ймовірності в кінцевому підсумку призводять до того, що система переходить у стан з меншою енергією. Зазвичай цей крок повторюється до тих пір, поки система не досягне стану, достатнього для програми, або поки не буде вичерпано заданий обчислювальний бюджет.

Оптимізація рішення включає оцінку сусідів стану проблеми, які є новими станами, створеними шляхом консервативної зміни даного стану. Наприклад, у проблемі мандрівного продавця, як правило, кожен штат визначається як перестановка міст, які потрібно відвідати, а сусідами будь-якої держави є сукупність перестановок, створених шляхом обміну будь-якими двома з цих міст. Чітко визначений спосіб, в якому держави змінюються для отримання сусідніх держав, називається "переміщенням", а різні ходи дають різні набори сусідніх держав. Ці кроки, як правило, призводять до мінімальних змін останнього стану, до спроби поступово вдосконалювати рішення шляхом ітеративного вдосконалення його частин (таких як міські сполучення у проблемі мандрівного продавця).

Проста евристика, така як сходження на пагорб, яка рухається шляхом пошуку кращого сусіда за кращим сусідом і зупиняється, коли вони досягли рішення, у якого немає кращих сусідів, не може гарантувати приведення до будь-якого з існуючих кращих рішень – їх результат може бути просто локальний оптимум, тоді як фактичним найкращим рішенням буде глобальний оптимум, який може бути іншим. Метагевристика використовує сусідів рішення як спосіб дослідження простору рішень, і хоча вони віддають перевагу кращим сусідам, вони також приймають гірших

сусідів, щоб уникнути застрягання в локальних оптимумах; вони можуть знайти глобальний оптимум, якщо працювати протягом досить довгого часу.

Назва та натхнення алгоритму вимагають цікавої особливості, пов’язаної зі зміною температури, яка повинна бути включена в експлуатаційні характеристики алгоритму. Це вимагає поступового зниження температури в процесі моделювання. Спочатку алгоритм починається з T, встановленого на велике значення (або нескінченність), а потім його зменшують на кожному кроці, дотримуючись певного графіка відпалу – який може бути вказаний користувачем, але повинен закінчуватися $T = 0$ до кінця відведеного бюджету часу. Таким чином, очікується, що система спочатку буде блукати до широкої області простору пошуку, що містить хороші рішення, ігноруючи дрібні особливості енергетичної функції; потім дрейфувати до низькоенергетичних регіонів, які стають вужчими і вужчими; і, нарешті, рухатись униз відповідно до евристики найкрутішого спуску.

Для будь-якої даної кінцевої задачі ймовірність того, що модельований алгоритм відпалу закінчується глобальним оптимальним рішенням, наближається до 1 у міру розширення графіка відпалу. Однак цей теоретичний результат не особливо корисний, оскільки час, необхідний для забезпечення значної ймовірності успіху, зазвичай перевищує час, необхідний для повного пошуку простору рішення.

2.4. Висновки до розділу

У другому розділі дипломної роботи було розлянуто основні алгоритми, що використовуються для групового контролю безпілотних апаратів. Найцікавішим можна видиліти мурашковий алгоритм – це клас алгоритмів оптимізації, змодельований на основі дії колонії мурах. Штучні "мурахи" (наприклад, імітаційні агенти) знаходять оптимальні рішення, рухаючись по простору параметрів, що представляє всі можливі рішення. Справжні мурахи відкладають феромони, спрямовуючи один одного на ресурси, досліджуючи навколишнє середовище. Модельовані «мурахи» аналогічним чином фіксують свої позиції та якість своїх

рішень, так що в подальших ітераціях моделювання більше мурашок знаходить кращі рішення. Одним із варіантів цього підходу є алгоритм бджіл, який є більш аналогічним шаблонам пошуку медоносної бджоли, іншої соціальної комахи.

Враховуючі дані отримані з перших двух розділів можна переходити до програмної реалізації модулю.

РОЗДІЛ 3
ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ МОДУЛЯ УПРАВЛІННЯ РУХОМ ГРУПИ ДИСТАНЦІЙНО КЕРОВАНИХ БПЛА

3.1. Ознайомлення з програмними інструментами для керування БпЛА

Безпілотники продовжуватимуть набирати популярність у суспільстві, в сферах від доставки ліків у віддалені райони до відстеження лісових пожеж. Однак важливо мати потужну базу функцій автопілота для керування цими безпілотниками, оскільки ручне управління може буде неможливим. Існують програмні інструменти з відкритим кодом, які можуть допомагати пришвидшити впровадження безпілотників з автопілотом:

- *Ardupilot*
- *Crowdsourcing*
- *Micro air vehicle*
- *ArduCopter*
- *OpenPilot*
- *Open-source robotics*
- *Paparazzi*
- *PX4 autopilot*
- *Slugs* (autopilot system)

3.1.1. Проект з відкритим кодом *ArduPilot*

ArduPilot – один з найпопулярніших проектів на основі *Arduino* з відкритим кодом для управління автономними транспортними засобами. Платформа *Ardupilot* складається з трьох основних компонентів, що стосуються обладнання, прошивки та програмного забезпечення. Їх основні підпроекти з підтримки різних транспортних засобів включають квадрокоптери, літаки та ровери.

ArduPilot дозволяє створювати та використовувати надійні, автономні, безпілотні системи транспортних засобів для цивільного використання. *ArduPilot* пропонує широкий набір інструментів, придатних для практично будь-якого автомобіля та додатків. Як проект з відкритим кодом, він постійно розвивається на основі швидкого зворотного зв'язку з боку великої спільноти користувачів. Команда розробників співпрацює із спільнотою та комерційними партнерами, щоб додати *ArduPilot* функціональність, яка вигідна кожному. Незважаючи на те, що *ArduPilot* не виробляє жодного обладнання, прошивка *ArduPilot* працює на різноманітному обладнанні для управління безпілотними транспортними засобами усіх типів. У поєднанні з програмним забезпеченням наземного управління безпілотні машини, що працюють на *ArduPilot*, можуть мати розширену функціональність, включаючи спілкування в реальному часі з операторами. *ArduPilot* має величезне Інтернет-співтовариство, присвячене допомозі користувачам у питаннях, проблемах та рішеннях

3.1.2. Проект з відкритим кодом *Paparazzi*

Paparazzi – це система автопілота з відкритим кодом, орієнтована на недорогі автономні літаки. Низька вартість та доступність дозволяють використовувати любителів у невеликих дистанційно пілотованих літаках. Проект розпочався у 2003 році, і надалі розробляється та застосовується у *École nationale de l'aviation civile* (*ENAC*), французькій академії цивільної аеронавтики. В даний час кілька постачальників виробляють автопілоти та аксесуари *Paparazzi*.

Автопілот дозволяє вилетіти з дистанційного керування літаком поза полем зору. Все апаратне та програмне забезпечення є відкритим та вільно доступним для будь-кого за ліцензійною угодою *GNU*. Автопілоти з відкритим кодом забезпечують гнучке апаратне та програмне забезпечення. Користувачі можуть легко модифікувати автопілот на основі власних особливих вимог, таких як оцінка лісових пожеж. Співробітники папарацці діляться ідеями та інформацією, використовуючи те саме програмне забезпечення *MediaWiki*, яке використовується Вікіпедією.

Paparazzi приймає команди та дані р датчиків і відповідно регулює управління польотом. Наприклад, командою може бути підйом з певною швидкістю, а папарацці регулюватимуть потужність та / або керувати поверхнями. Станом на 2010 рік папарацці не мали хорошої функції утримання та зміни швидкості, оскільки контролер не враховує зчитування датчика швидкості повітря. У 2013 році Технологічний університет *Delft* випустив свій проект чіпів *Lisa*/*S*, який базується на *Paparazzi*.

Paparazzi підтримує кілька апаратних конструкцій, включаючи мікроконтролери серії *STM32* та *LPC2100*. Випущено низку файлів *CAD*.

Папарацці передбачає мінімальний набір датчиків польоту:

– Оцінка відношення (орієнтація до центру мас) проводиться за допомогою набору інфрачервоних термоелементів.
– Положення та висота надходять із стандартного приймача *GPS*.
– Вимірювання швидкості може здійснюватися за допомогою додаткового гіроскопа.
– Прискорення від додаткових інерційних датчиків.
– Напрямок від додаткових магнітних датчиків.

3.1.3. Набір із засобів розробки *Dronecode*

Dronecode SDK – це бібліотека *MAVLink* для стеку польотів *PX4* з *API* для *C++* та *iOS*. Бібліотека забезпечує простий *API* для управління одним або декількома транспортними засобами, забезпечуючи програмний доступ до інформації про транспортні засоби та телеметрії, а також контроль за місіями, пересуванням та іншими операціями.

Бібліотека може працювати на супутниковому комп’ютері на транспортному засобі або на наземному *GCS* або мобільному пристрої (ці пристрої мають значно більшу обчислювальну потужність, ніж звичайний контролер польоту, дозволяючи використовувати такі засоби, як комп’ютерний зір, уникнення перешкод і планування маршруту).

Розробники можуть розширити основний *C++ SDK* за допомогою плагінів, щоб додати будь-який інший необхідний *API MAVLink* (наприклад, інтегрувати *PX4* із користувацькими камерами, карданними підключеннями чи іншим обладнанням через *MAVLink*).

Міжплатформні обгортки для основної бібліотеки активно розробляються. Вони переважно використовують *gRPC* (*gRPC Remote Procedure Calls*) – систему віддаленого виклику процедур із відкритим кодом (*RPC*), спочатку розроблена в *Google* у 2015 році. Вона використовує *HTTP2* для транспортування трафіку, буфери протоколів як мову опису інтерфейсу, а також надає такі функції, як аутентифікація, двоспрямована потокова передача та управління потоком, блокування або неблокування прив'язок, а також скасування та тайм-аути. Вона генерує прив'язки міжплатформенних клієнтів та серверів для багатьох мов. Найбільш поширені сценарії використання включають підключення служб у архітектурі стилю мікросервісів та підключення мобільних пристроїв, клієнтів браузера до серверних сервісів.

Dronecode SDK знаходиться в стадії розробки. Створено основний *API C++* і він (в основному) стабільний. Розробка *iOS* підтримується за допомогою бібліотеки *Dronecode-SDK-Swift*. Інші крос-платформні обгортки активно розробляються і повинні бути випущені найближчим часом.

Основна бібліотека написана на *C++*, з автоматично згенерованими прив'язками для інших підтримуваних мов програмування.

Бібліотека є:

– Простою та прямою у використанні. Він має *API*, який підтримує як синхронні (блокування), так і асинхронні дзвінки (з використанням зворотних викликів).
– Швидка та надійна. Створена для використання на борту з використанням високошвидкісних повідомлень.
– Кроссплатформенність (*Linux, macOS, Windows, iOS, Android*).
– Розширюваний за допомогою плагінів під час компіляції.

Основними можливостями базового *API* є (на всіх мовах програмування):

– Підтримка керування до 255 дронів через *TCP*, *UDP* або послідовне з'єднання.
– Отримання інформацію про транспортні засоби (постачальник, версії програмного забезпечення, версії продуктів тощо)
– Отримання телеметрії та інформації про стан дрона (наприклад, режим польоту, *RC*-зв'язок, акумулятор, *GPS*, тощо) та встановлення періоду оновлення телеметрії.
– Надсилання команди до дронів в реальному часі.
– Створення місій та керування ними в реальному часі.
– Керування камерою та карданним підвісом як під час, так і поза місій.
– Надсилання команди для безпосереднього контролю руху дрона.
– Надсилання команди для калібрування датчиків.

3.1.4. Протокол обміну повідомленнями *MAVLink*

M*AVLink* – це дуже легкий протокол обміну повідомленнями для спілкування з безпілотниками (та між бортовими компонентами дронів).

MAVLink дотримується сучасного гібридного шаблону публікації-підписки та проектування "точка-точка": потоки даних надсилаються / публікуються як теми, тоді як підпротоколи конфігурації, такі як протокол місії або протокол параметрів, передаються від точки до точки з повторною передачею.

Повідомлення визначаються у файлах *XML*. Кожен файл *XML* визначає набір повідомлень, що підтримується певною системою *MAVLink*, яка також називається "діалект". Набір довідкових повідомлень, який реалізується більшістю наземних станцій управління та автопілотів, визначений у *common.xml* (більшість діалектів будується поверх цього визначення).

Інструментарій *MAVLink* використовує визначення повідомлень *XML* для створення бібліотек *MAVLink* для кожної з підтримуваних мов програмування. Дрони, наземні станції управління та інші системи *MAVLink* використовують створені бібліотеки для зв'язку. Вони, як правило, мають ліцензію *MIT*, і тому їх можна

використовувати без обмежень у будь-якій програмі із закритим кодом без публікації вихідного коду програми.

Вперше *MAVLink* був випущений на початку 2009 року Лоренцом Мейєром і зараз має значну кількість авторів.

Ключові особливості протоколу:

– Дуже ефективний. *MAVLink* 1 має лише 8 байт накладних витрат на пакет, включаючи знаки запуску та виявлення падіння пакета. *MAVLink* 2 має лише 14 байт накладних витрат (але він набагато більш безпечний і розширюваний протокол). Оскільки *MAVLink* не вимагає додаткового кадрування, він дуже добре підходить для додатків з дуже обмеженою пропускною здатністю зв'язку.
– Дуже надійний. *MAVLink* використовується з 2009 року для зв'язку між різними транспортними засобами, наземними станціями (та іншими вузлами) за різноманітними та складними каналами зв'язку (висока затримка / шум). Він надає методи виявлення падінь пакетів, пошкодження та аутентифікації пакетів.
– Підтримує багато мов програмування, що працюють на численних мікроконтролерах / операційних системах (включаючи *ARM7*, *ATMega*, *dsPic*, *STM32* та *Windows*, *Linux*, *MacOS*, *Android* та *iOS*).
– Дозволяє до 255 одночасних систем у мережі (транспортні засоби, наземні станції тощо)
– Включає в себе як зовнішній, так і бортовий зв'язок (наприклад, між *GCS* та безпілотником, а також між автопілотом безпілотника та камерою бездротового з підтримкою *MAVLink*).

Безпровідний формат *MAVLink* оптимізований для систем з обмеженими ресурсами, а отже, порядок полів не такий, як у специфікації *XML*. Генератор бездротової мережі сортує всі поля повідомлення за розміром, причому спочатку найбільші поля (*uint64*_t), а потім – до менших полів. Сортування здійснюється за допомогою стабільного алгоритму сортування, який гарантує, що будь-які поля, які

не потрібно впорядковувати, залишаються в однаковому відносному порядку. Це запобігає проблемам вирівнювання в системах кодування / декодування та дозволяє дуже ефективно упаковувати / розпаковувати дані.

MAVLink створений для гібридних мереж, де високошвидкісні потоки даних з джерел даних (зазвичай безпілотних літальних апаратів) надходять до раковин даних (зазвичай наземних станцій), але змішуються з передачами, що вимагають гарантованої доставки. Ключове розуміння полягає в тому, що для більшості потоків телеметрії немає відомого або єдиного одержувача: Натомість, як правило, бортовий комп'ютер, наземна станція управління та хмарна система потребують однакового потоку даних.

З іншого боку, конфігурування бортової місії або зміна конфігурації системи за допомогою вбудованих параметрів вимагає зв'язку точка-точка з гарантованою доставкою. *MAVLink* досягає дуже високої ефективності, дозволяючи обидва режими роботи.

MAVLink реалізує дві перевірки цілісності: Перша перевірка цілісності пакета під час передачі з використанням контрольної суми *X.25* (*CRC-16-CCITT*). Однак це лише гарантує, що дані не були змінені за посиланням – це не забезпечує узгодженість з визначенням даних. Друга перевірка цілісності стосується опису даних, щоб переконатися, що два повідомлення з однаковим ідентифікатором дійсно містять однакову інформацію. Для досягнення цього саме визначення даних запускається через *CRC-16-CCITT* і отримане значення використовується для зародження пакета *CRC*. Більшість довідкових реалізацій зберігають цю константу в масиві з назвою CRC_*EXTRA*.

3.1.5. Система автопілоту з відкритим кодом *PX4 Autopilot*

PX4 Autopilot – це система автопілота з відкритим кодом, орієнтована на недорогі автономні літаки. Низька вартість та доступність дозволяють використовувати любителів у невеликих дистанційно пілотованих літаках. Проект розпочався у 2009 р. і надалі розробляється та використовується в Лабораторії комп'ютерного зору та геометрії *ETH Zurich* (Швейцарський федеральний

технологічний інститут) за підтримки лабораторії автономних систем та лабораторії автоматичного управління. В даний час кілька постачальників виробляють автопілоти та аксесуари *PX4*.

Автопілот дозволяє вилетіти з дистанційного керування літаком поза полем зору. Все апаратне та програмне забезпечення є відкритим і доступним для всіх, хто має ліцензію *BSD*. Автопілоти безкоштовного програмного забезпечення забезпечують більш гнучке апаратне та програмне забезпечення. Користувачі можуть змінити автопілот на основі власних спеціальних вимог.

Набір програмного забезпечення з відкритим кодом містить усе, що дозволяє літати бортовій системі, включаючи:

– *QGroundControl*
– Протокол зв'язку *MAVLink*
– *2D*/*3D* аерокарти (за підтримки *Google Earth*)
– Точки *drag-and-drop*

Інші проекти робототехніки з відкритим кодом, що є аналогами до *PX4*, включають:

– *Paparazzi*
– *ArduCopter*
– *Slugs*
– *OpenPilot*

PX4 складається з двох основних рівнів: стек польоту – це система оцінки та управління польотом, а проміжне програмне забезпечення – це загальний рівень робототехніки, який може підтримувати будь-який тип автономного робота, забезпечуючи внутрішній / зовнішній зв'язок та інтеграцію обладнання.

Усі літальні апарати *PX4* мають єдину кодову базу (сюди входять інші роботизовані системи, такі як човни, ровери, підводні човни тощо). Повна конструкція системи реактивна, а це означає, що:

– Вся функціональність поділяється на змінні та багаторазові компоненти.
– Зв'язок здійснюється шляхом асинхронного передавання повідомлень.

– Система може впоратися з різним навантаженням.

На рисунку 3.1 нижче наведено детальний огляд будівельних блоків *PX4*. У верхній частині діаграми містяться проміжні блоки, тоді як у нижній частині – компоненти стеку польоту.

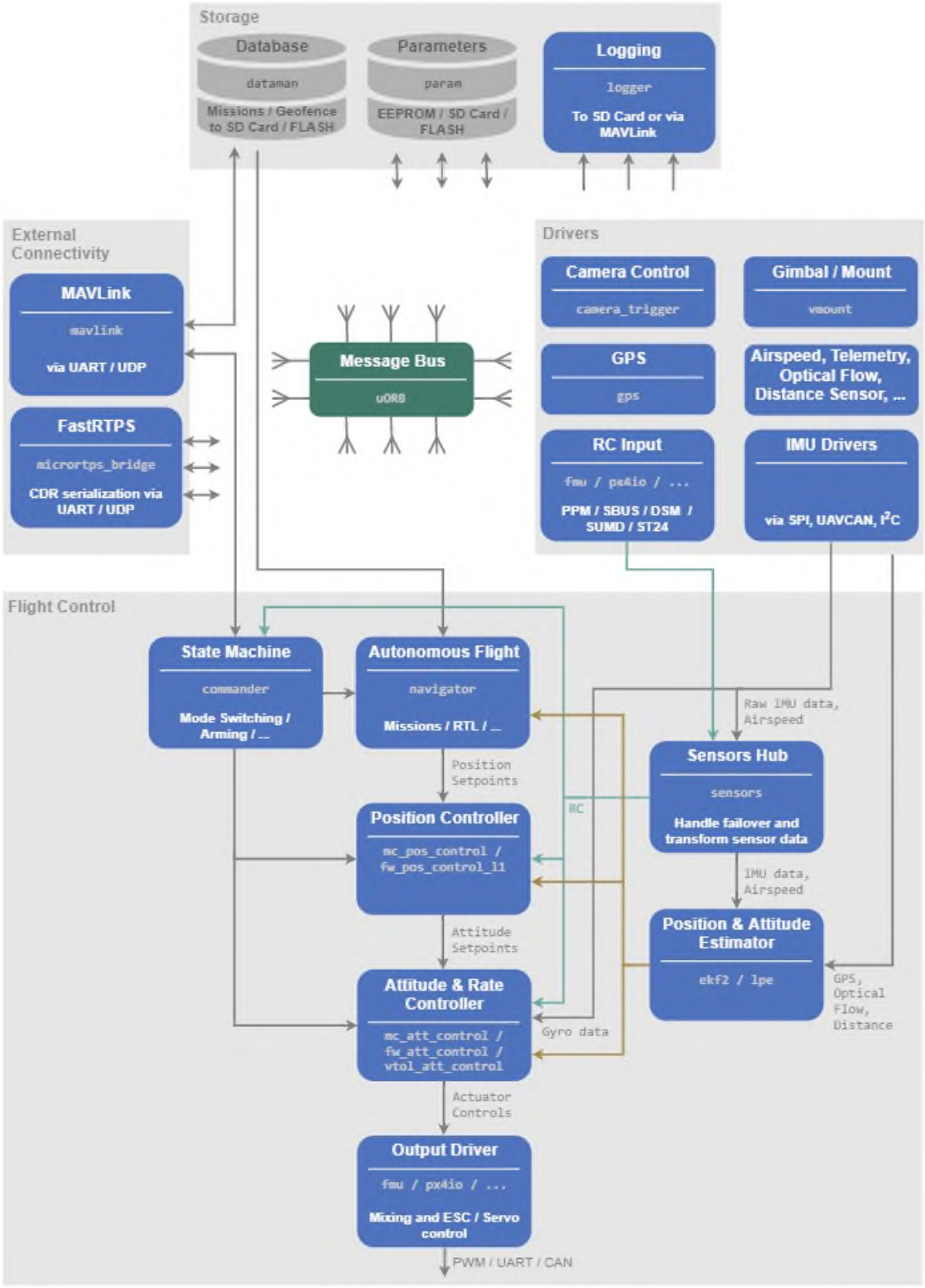

Рис. 3.1. Архітектура високого рівня програмного забезпечення *PX4*

Вихідний код розділений на самостійні модулі / програми (показано на схемі в монопросторі). Зазвичай будівельний блок відповідає рівно одному модулю.

Стрілки показують потік інформації про найважливіші зв'язки між модулями. Насправді з'єднань набагато більше, ніж показано, і більшість модулів отримують доступ до деяких даних (наприклад, для параметрів).

Модулі взаємодіють між собою через шину повідомлень публікації-передплати з назвою *uORB*. Використання схеми публікації-передплати означає, що:

– Система реактивна, вона є асинхронною і миттєво оновлюється, коли з'являються нові дані.
– Всі операції та зв'язок повністю паралелізовані.
– Системний компонент може споживати дані з будь-якого місця в безпечному для потоку режимі.

Стек польоту являє собою набір алгоритмів наведення, навігації та управління для автономних безпілотників. Він включає в себе контролери для планерних конструкцій з фіксованим крилом, мультиротора та *VTOL*, а також оцінювачі положення та положення.

На наступному рисунку 3.2 наведено огляд будівельних блоків стеку. Він містить повний трубопровід від датчиків, *RC*-входу та автономного управління польотом (*Navigator*), аж до двигуна або сервоуправління (*Actuators*).

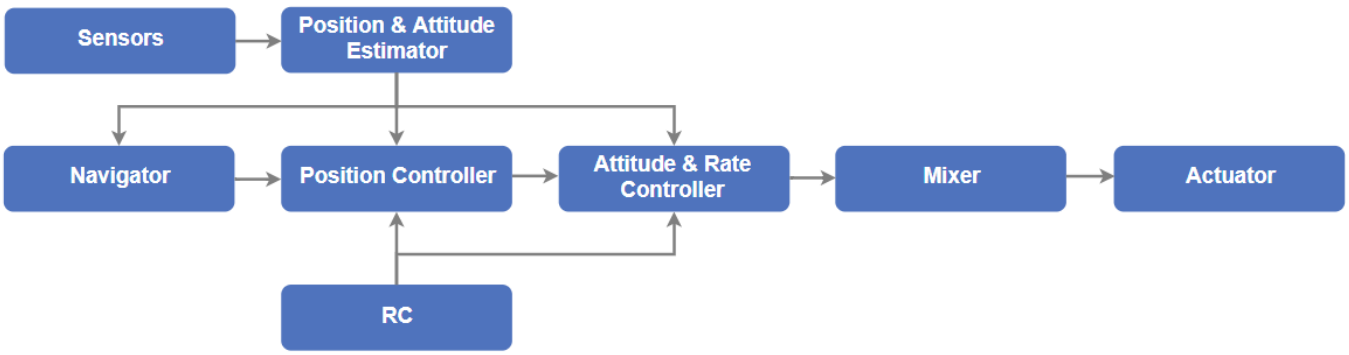

Рис. 3.2. Архітектура стека польотів *PX4*

Estimator приймає один або більше входів датчика, комбінує їх і обчислює стан транспортного засобу (наприклад, ставлення з даних датчика *IMU*).

Controller – це компонент, який приймає задане значення та вимірювання або розрахунковий стан (змінну процесу) як вхідні дані. Його мета – відкоригувати значення змінної процесу таким чином, щоб воно відповідало заданому значенню. Результатом є корекція, щоб з часом досягти цієї заданої величини. Наприклад, контролер положення приймає задані значення положення як вхідні дані, змінною процесу є поточно оцінюване положення, а вихідним є задане значення положення та тяги, яке рухає транспортний засіб у бажане положення.

Mixer приймає команди руху (наприклад, поверніть праворуч) і перетворює їх на окремі команди двигуна, забезпечуючи при цьому не перевищення деяких обмежень. Це перетворення є унікальним для типу транспортного засобу і залежить від різних факторів, таких як розташування двигуна щодо центру ваги або інерція обертання транспортного засобу.

Проміжне програмне забезпечення складається в основному з драйверів пристроїв для вбудованих датчиків, зв’язку із зовнішнім світом (супутній комп’ютер, *GCS* тощо) та шиною повідомлень публікації-передплати uORB.

Крім того, проміжне програмне забезпечення включає шар імітації, що дозволяє коду польоту *PX4* працювати в настільній операційній системі та керувати комп’ютером, змодельованим в імітованому "світі".

3.2. Розробка модуля дистанційного управління рухом групи БпЛА

Для реалізації програмного модуля дистанційного управління рухом БпЛА буде використана мова програмування *C++* та бібліотека *Dronecode SDK*. Програмній модуль зможе керувати від 1 до 255 дронів одночасно. На рисунках 3.3 та 3.4 представлені схеми алгоритму програми.

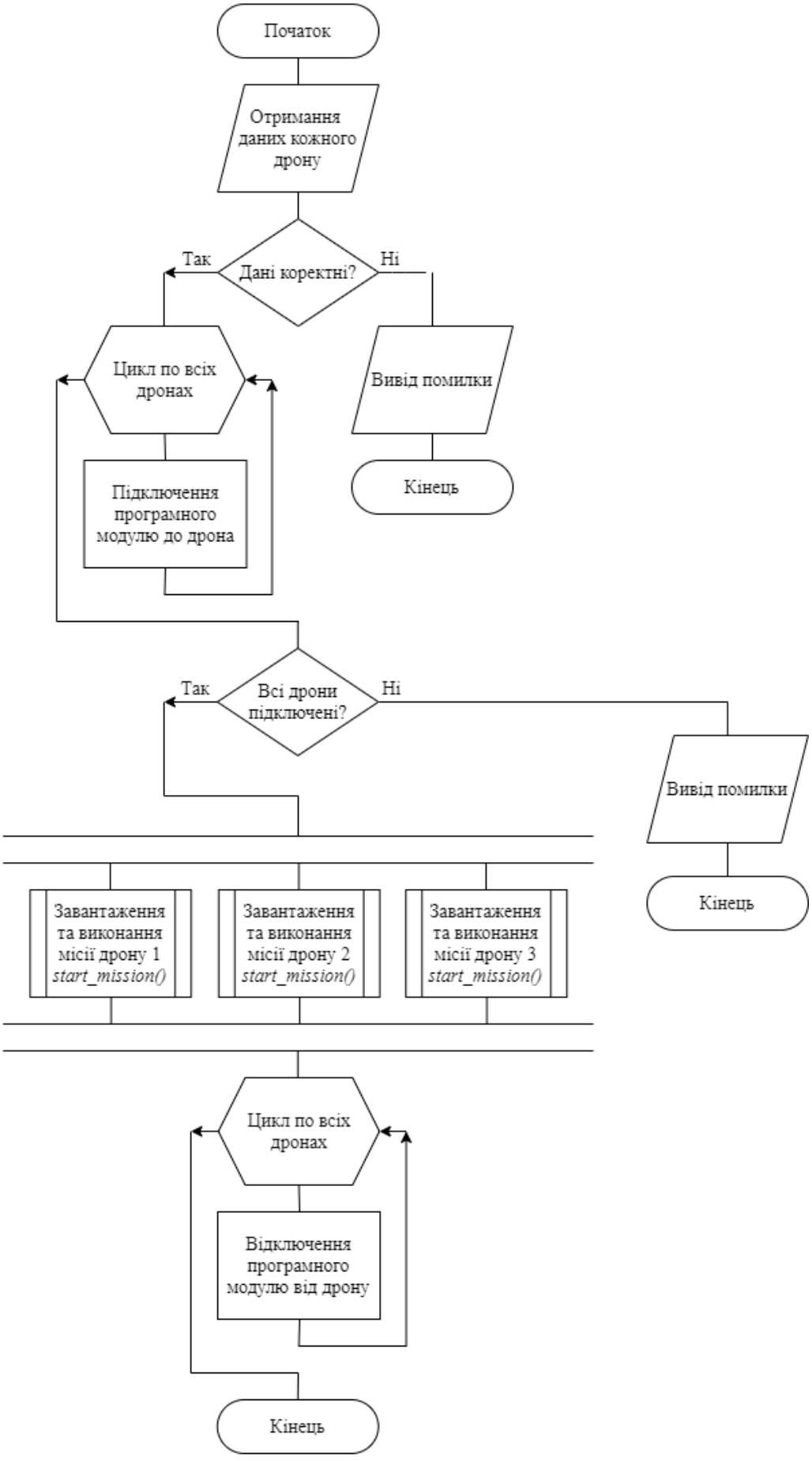

Рис. 3.3. Схема алгоритму модуля

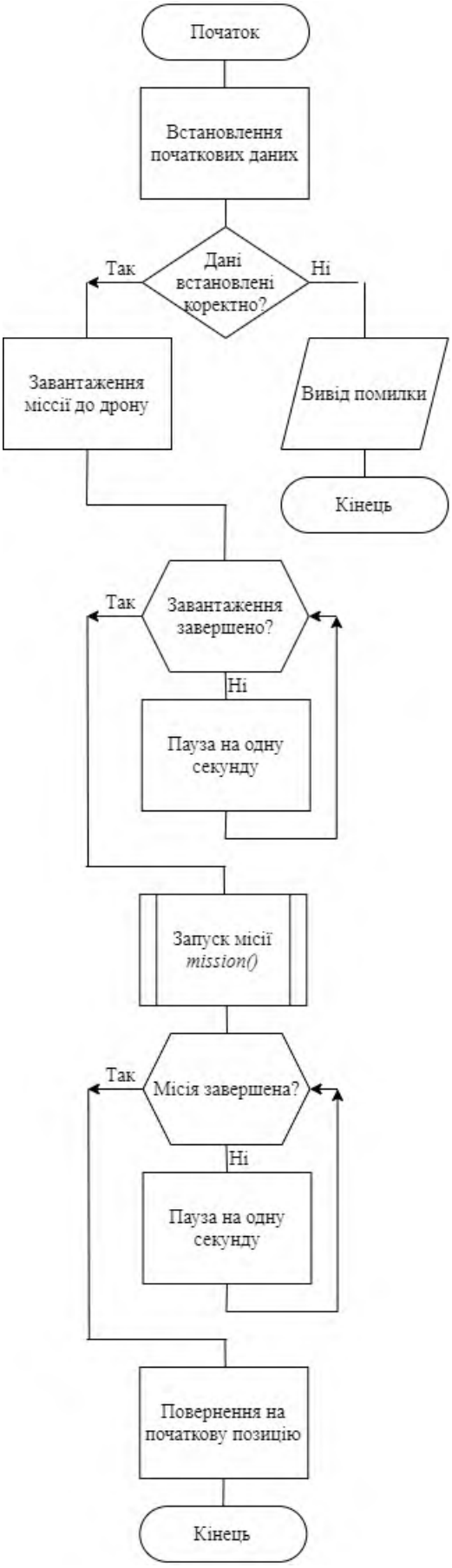

Рис. 3.4. Схема алгоритму фунції *start_mission()*

Розглянемо більш детально програмний код модулю групового керування. Далі представлені фрагменти коду з поясненями.

Перш за все, необхідно підключити необхідні бібліотеки та компоненти:

```
#include <mavsdk/mavsdk.h>
#include <mavsdk/plugins/action/action.h>
#include <mavsdk/plugins/mission/mission.h>
#include <mavsdk/plugins/telemetry/telemetry.h>

#include <cstdint>
#include <iostream>
#include <thread>
#include <chrono>
#include <functional>
#include <future>
#include <memory>
#include <string>
#include <ctime>
#include <fstream>

using namespace mavsdk;
using namespace std::this_thread;
using namespace std::chrono;
```

Далі йде перевірка вхідних парамметрів та вивід помилки, якщо дані введено некоректно:

```
if (argc % 2 == 0 || argc == 1)
{
std::cerr
<< ERROR
<< "Not all data specified"
```

```
<< OUTPUT << std::endl;
return 1;
}
```

Якщо перевірка пройдена успушно, то програмній модуль намагається підключитись до всіх заданих дронів. Помилка в підключенні до будь-якого з дронів призвиде до виводу тексту помилки та завершенню програми:

```
for (size_t i = 1; i <= total_ports_used; ++i)
{
ConnectionResult connection_result = mavsdk.add_any_connection(argv[i]);
if (connection_result != ConnectionResult::Success)
{
std::cerr << ERROR << "Failed to connect: "
<< connection_result
<< OUTPUT << std::endl;
return 1;
}
}
std::atomic<size_t> num_systems_discovered{0};
std::cout << "Conecting drones..." << std::endl;
mavsdk.subscribe_on_new_system([&mavsdk, &num_systems_discovered]()
{
const auto systems = mavsdk.systems();
if (systems.size() > num_systems_discovered)
{
std::cout << "Connected drones" << std::endl;
num_systems_discovered = systems.size();
}
});
```

Також необхідна перевірка, що всі задані дрони успішно знайдені та підключені до модулю:

```
if (num_systems_discovered != total_ports_used)
{
std::cerr << ERROR << "Failed to discover some drones."
<< OUTPUT
<< std::endl;
return 1;
}
```

Переконавшись, що всі дрони успішно підєднані до програмного модулю можна запускати віконання заданого завдання:

```
for (auto system : mavsdk.systems())
{
std::thread t(&start_mission, argv[planFile_provided], system);
threads.push_back(
std::move(t));
planFile_provided += 1;
sleep_for(seconds(1));
}
for (auto& t : threads)
{
t.join();
}
```

Виконання задання кожного дрону відбувається паралельно в функції *start_mission()*. Розглянемо те, як выдбувається віконання місії. Спочатку для кожного дрону встановлюється частота оновлення даних. В нашому випадку це 1 *Гц*, тобто оновлення даних відбувається кожної секунди:

```
const Telemetry::Result set_rate_result = telemetry->set_rate_position(1.0);
```

В випадку невдалого встановлення цього значення виконання дроном завдання не є можливим, тому функція завершується:

```
if (set_rate_result != Telemetry::Result::Success)
{
```

```
std::cerr << ERROR << "Error to set refresh period:" << set_rate_result
<< OUTPUT << std::endl;
return;
}
```

Створюєто файл, в який буде записана вся інформація необхідна дрону для виконання місії:

```
std::ofstream plan;
plan.open((std::to_string(system->get_system_id()) + ".csv"));plan << "Time,
Vehicle_ID, Altitude, Latitude, Longitude, Absolute_Altitude, \n";
telemetry->subscribe_position([&](Telemetry::Position location) {
plan << getCurrentTimeString() << ","
<< (system->get_system_id()) << ","
<< location.relative_altitude_m << ","
<< location.latitude_deg << ","
<< location.longitude_deg << ","
<< location.absolute_altitude_m << ", \n";
});
```

Перевіряємо, чи готовий дрон до запуску. Якщо ні, то очікуємо доки всі перевірки будуть завершені:

```
while (data->health_all_ok() != true)
{
std::cout << "Waiting for drone do be ready" << std::endl;
sleep_for(seconds(1));
}
```

Далі завантажуємо файл з даними місії до дрону та перевіряємо, що файл коректний:

```
std::pair<Mission::Result, Mission::MissionPlan> mission_file =
mission->import_qgroundcontrol_mission(qgc_plan);
handle_mission_err_exit(mission_file.first, " Error while importing mission file: ");
if (mission_file.second.mission_items.size() == 0)
```

```
{
std::cerr << "Invalid file." << std::endl;
exit(EXIT_FAILURE);
}
```

Якщо все добре, завантажуємо файл:

```
std::cout << "Load." << std::endl;
auto prom = std::make_shared<std::promise<Mission::Result>>();
auto future_result = prom->get_future();
mission->upload_mission_async(
mission_file.second, [prom](Mission::Result result) { prom->set_value(result); });
const Mission::Result result = future_result.get();
handle_mission_err_exit(result, "Mission upload failed: ");
std::cout << "Uuploaded." << std::endl;
```

Перш ніж починати виконання місії, підписуємося на неї, щоб отримувати дані прогресу:

```
const Action::Result result_sts = action->arm();
handle_action_err_exit(result_sts, "Arm failed: ");
mission->subscribe_mission_progress([&](Mission::MissionProgress mission_progress)
{
std::cout << "Status, VehicleID: " << system->get_system_id() << " --> "
<< mission_progress.current << " / " << mission_progress.total << std::endl;
});
```

Тепер, коли всі підготовки завершені, можна починати виконання завдання дроном:

```
auto t = std::make_shared<std::tise<Mission::Result>>();
auto res = t->get_future();
mission->start_mission_async([t](Mission::Result result) {
t->set_value(result);
});
const Mission::Result result = res.get();
```

handle_mission_err_exit(result, "Error whule starting!");

Після запуску місії дрона програмний модуль починає очікування її завершення:

```
while (!mission->is_mission_finished().second)
{
sleep_for(seconds(1));
}
```

Коли завдання успішно виконане дрон повертається до свого початкового положення:

```
const Action::Result result = action->return_to_launch();
```

Тут також необхідна перевірка, що повернення виконане успішно та дрон повернувся то початку:

```
if (result != Action::Result::Success)
{
std::cout << "Error while returning to launch (" << result << ")" << std::endl;
}
else
{
std::cout << "Succesfully returned to launch " << std::endl;
}
```

Після повернення всіх дронів до своїх початкових положень програмний модуль завершує свою роботу.

3.3. Тестування модуля дистанційного управління рухом групи БпЛА

Для перевірки роботи програмного модулю буде використана утиліта *PX4 Autopilot*, яка була розглянута в другому розділі, для симуляції дронів. Та програма *QGroundControl* для відображення руху апаратів. *QGroundControl* добре працює на будь-якому сучасному комп’ютері чи мобільному пристрої. Для встановлення йогона лінукс достатньо встановити деякі залежності за допомогою команд:

sudo usermod -a -G dialout $USER

sudo apt-get remove modemmanager -y

sudo apt install gstreamer1.0-plugins-bad gstreamer1.0-libav gstreamer1.0-gl -y

Після цього можна скачати програму з офіціфного сайту та запускати через іконку запуску або команду терміналу:

chmod +x ./QGroundControl.AppImage

./QGroundControl.AppImage

Основний інтерфейс програми показаний на рисунку 3.5.

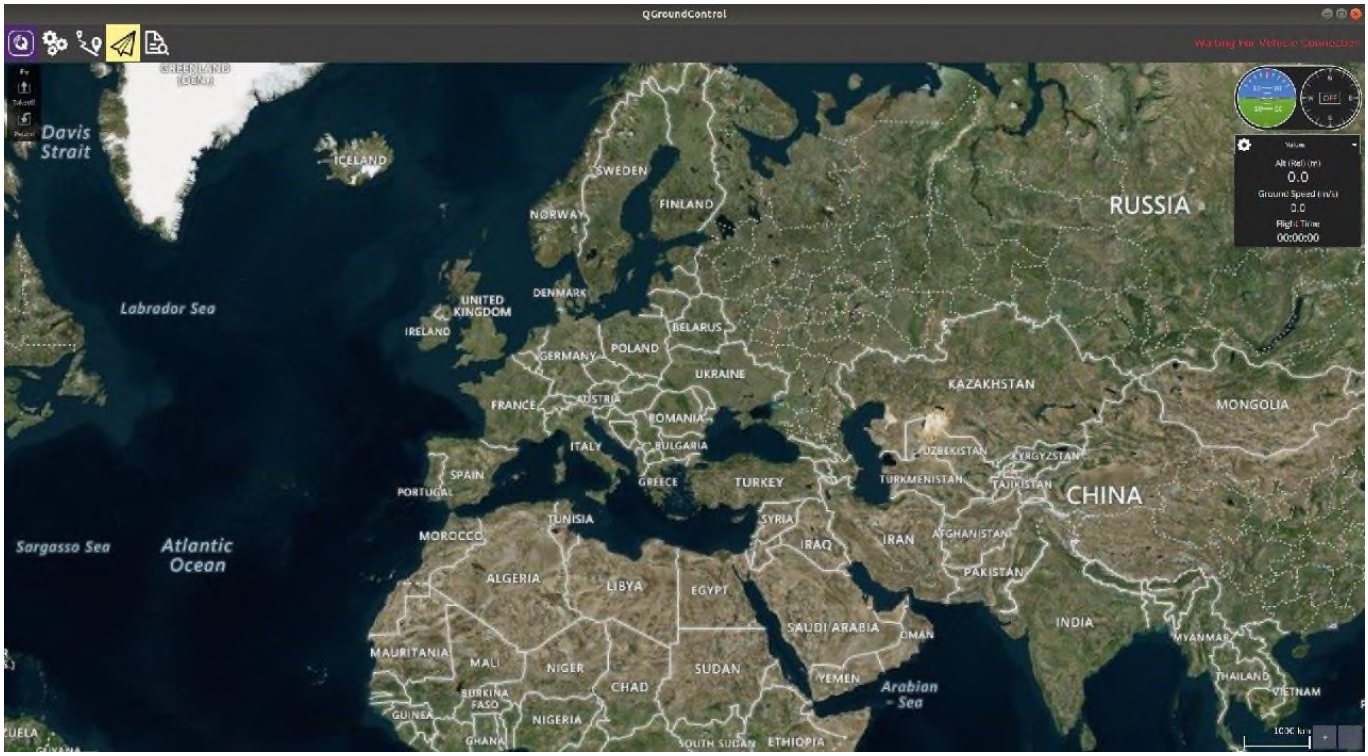

Рис. 3.5. Інтерфейс *QGroundControl*

Для встановлення *PX4 Autopilot* потрібно завантажити файли програм з віддаленого репозиторію. Зробити це можна наступним чином:

git clone https://github.com/PX4/PX4-Autopilot.git --recursive

Далі потрібно запустити скрип для встановлення утиліти:

bash ./Tools/setup/ubuntu.sh

Після чого *PX4 Autopilot* готовий до застосування.

Для тестування програмного модулю на потрібно створити симуляцію трьох дронів. Процес створення та вивід утилиті *PX4 Autopilot* показаний на рисунках 3.6 - 3.10.

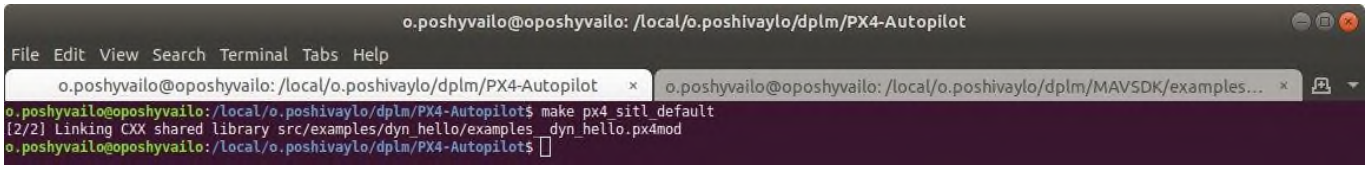

Рис. 3.6. Компіляція бібліотеки *PX4 Autopilot*

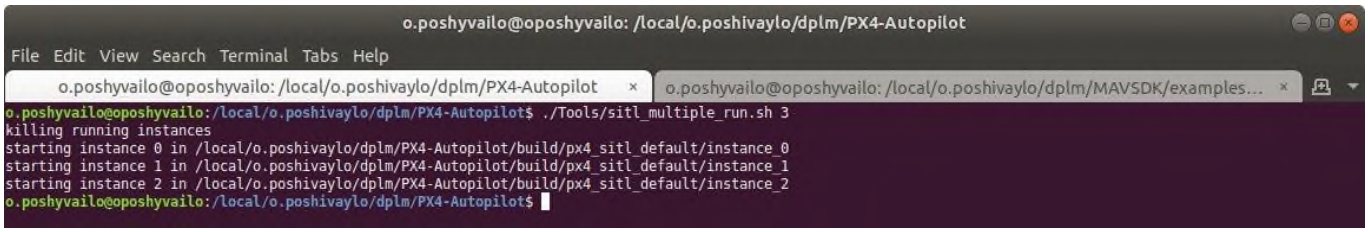

Рис. 3.7. Ініціювання трьох дронів

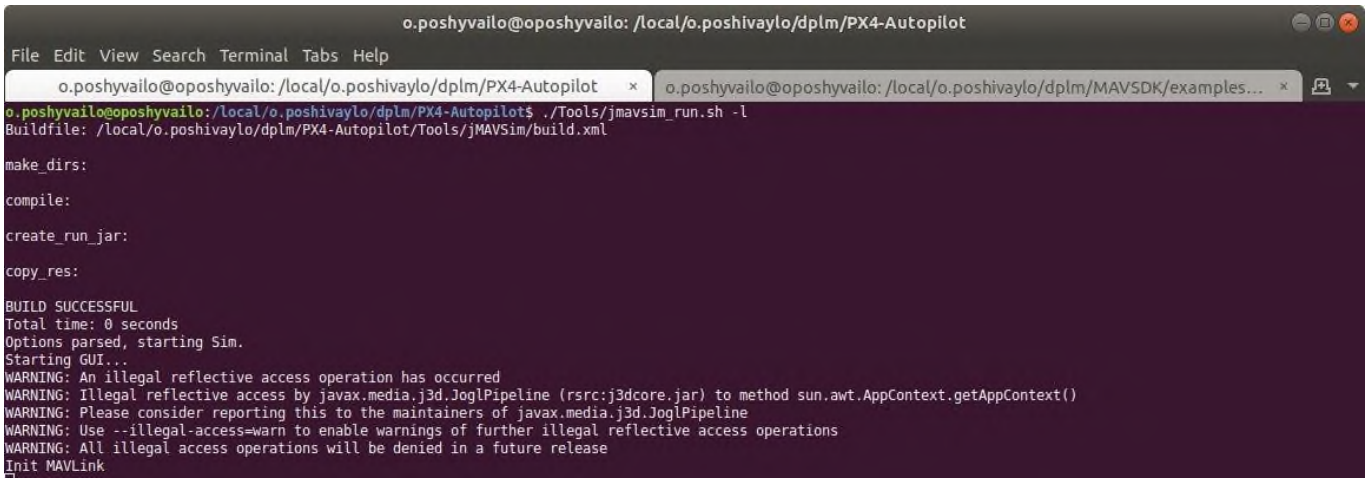

Рис. 3.8. Створення першого дрону

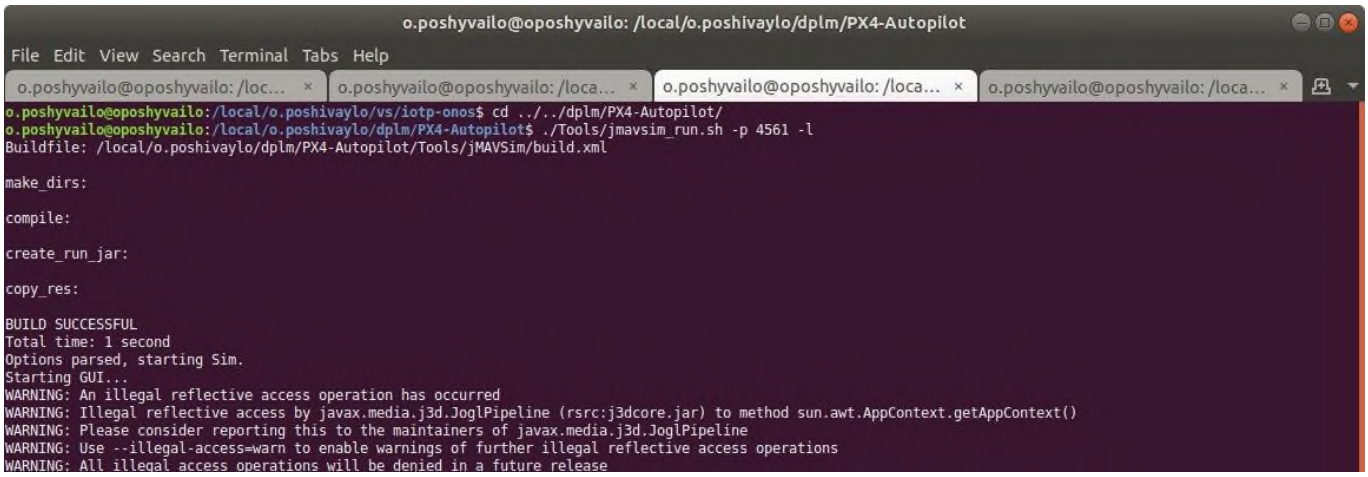

Рис. 3.9. Створення другого дрону

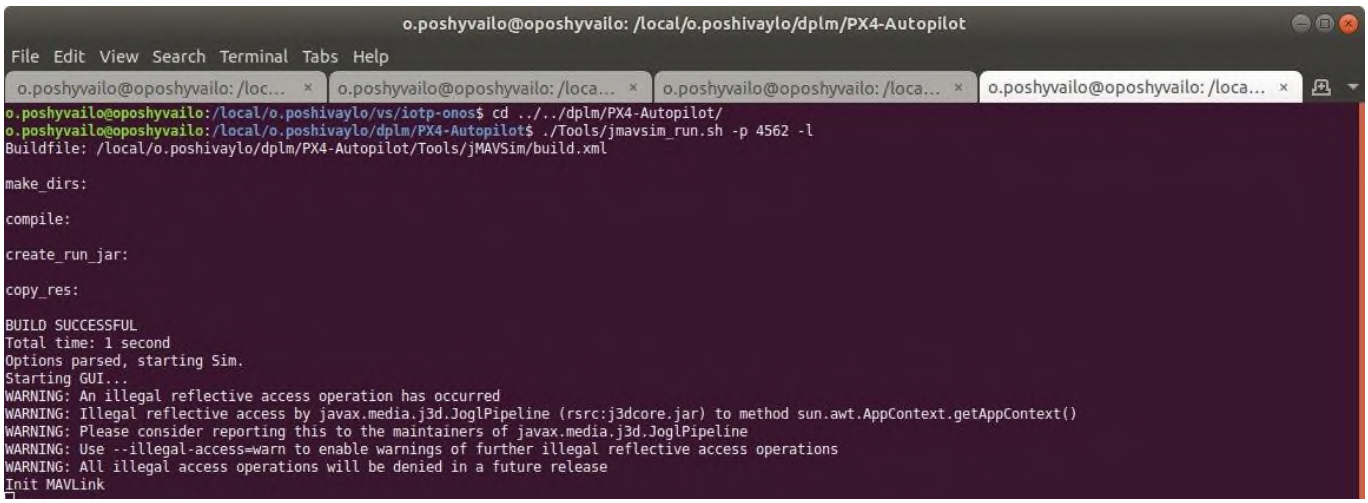

Рис. 3.10. Створення третього дрону

Після виконання даних команд буде відкрито три графічних вікна з симуляціями дронів як показано на малюнку 3.11.

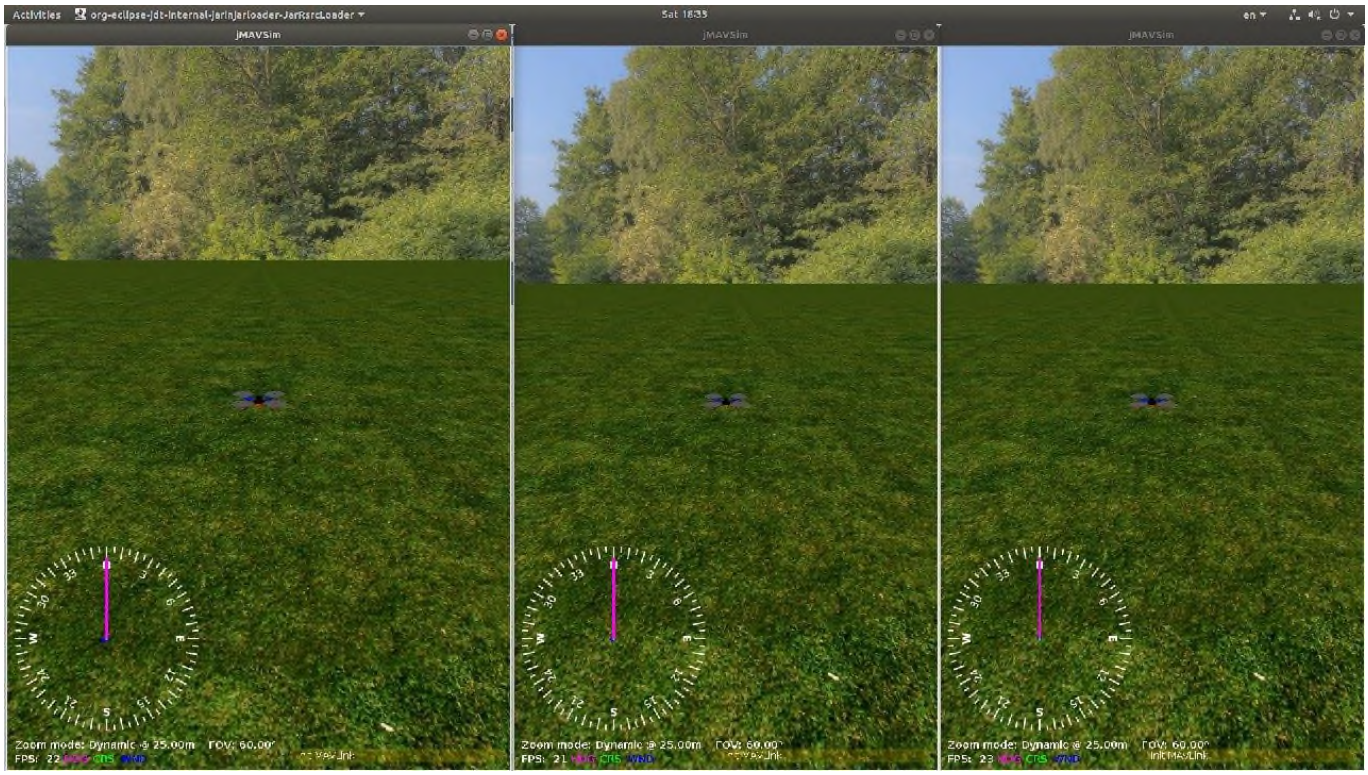

Рис. 3.11. Створення третього дрону

Також дрони мають відобразитись в програмі *QGroundControl* на заданих місцях. Для даного прикладу було вибрано територію Національного Авіаційного Університету, як зображено на малюнку 3.12.

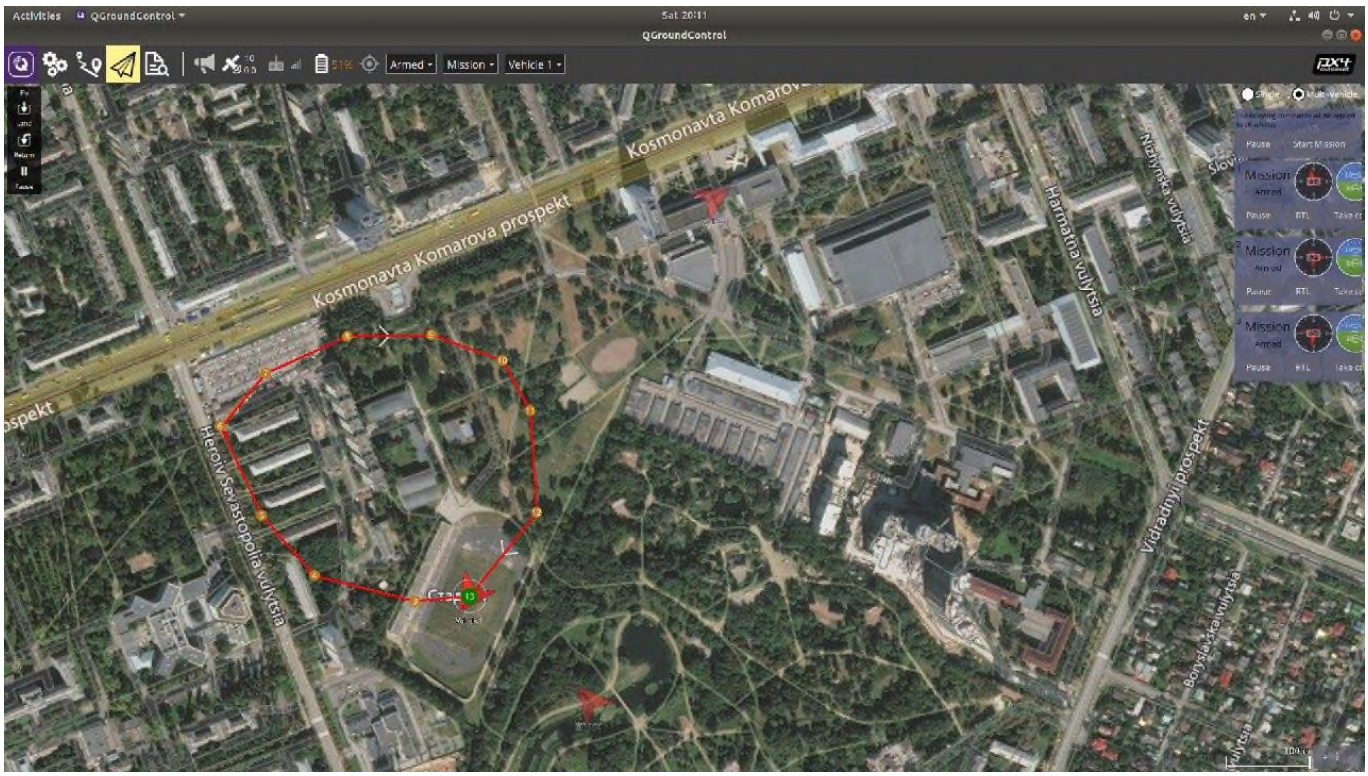

Рис. 3.12. Відображення дронів в *QGroundControl*

Тепер можна запускати програмній модуль для керування рухом групи безпілотних апаратів. Запуск та лог показаний на малюнку 3.13.

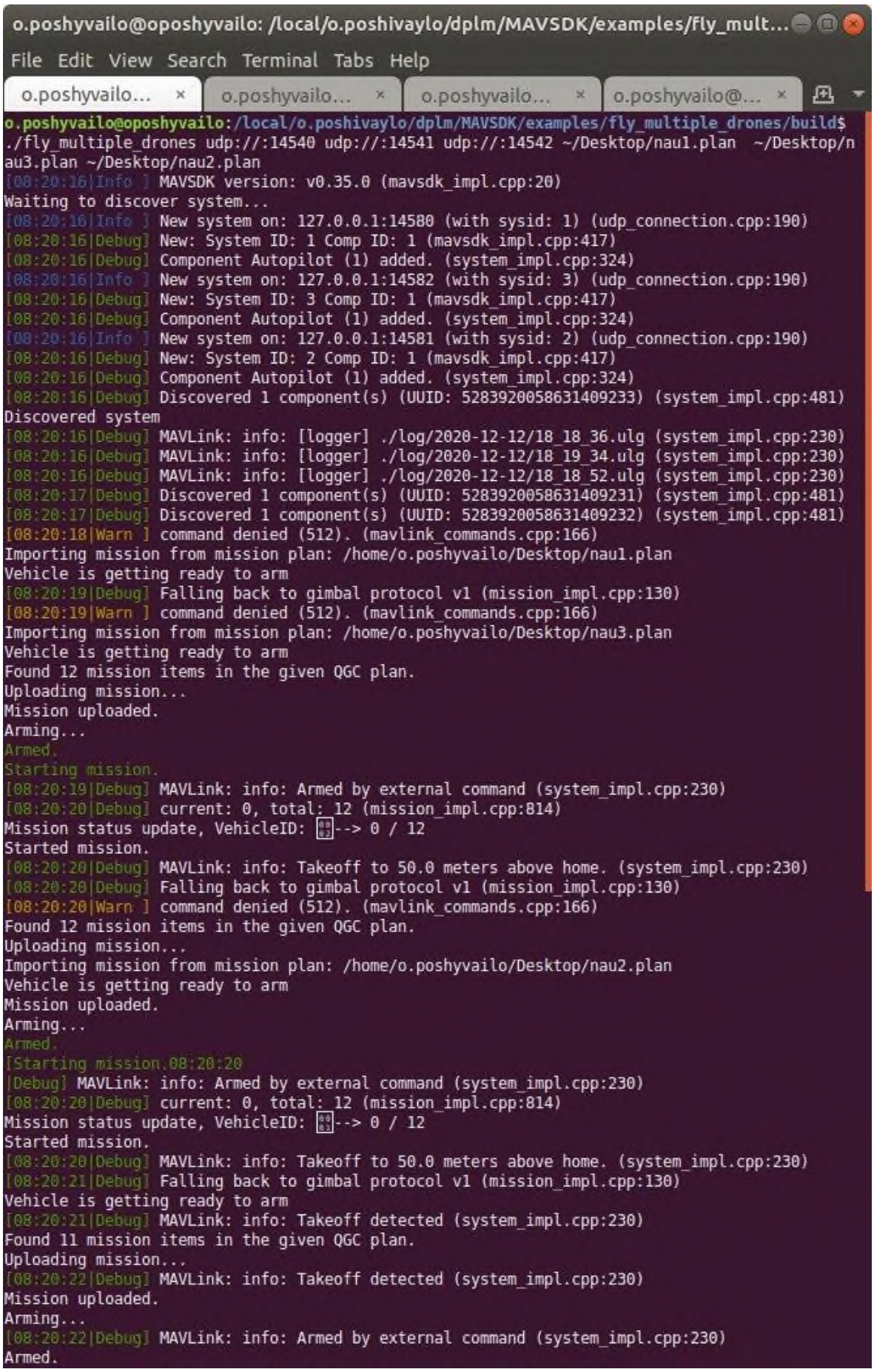

Рис. 3.13. Запуск програмного модуля

Образу після запуску програми можна побачити виконання дронами маневрів в обох програмах. На рисунках 3.14 та 3.15 показаний процес руху дронів.

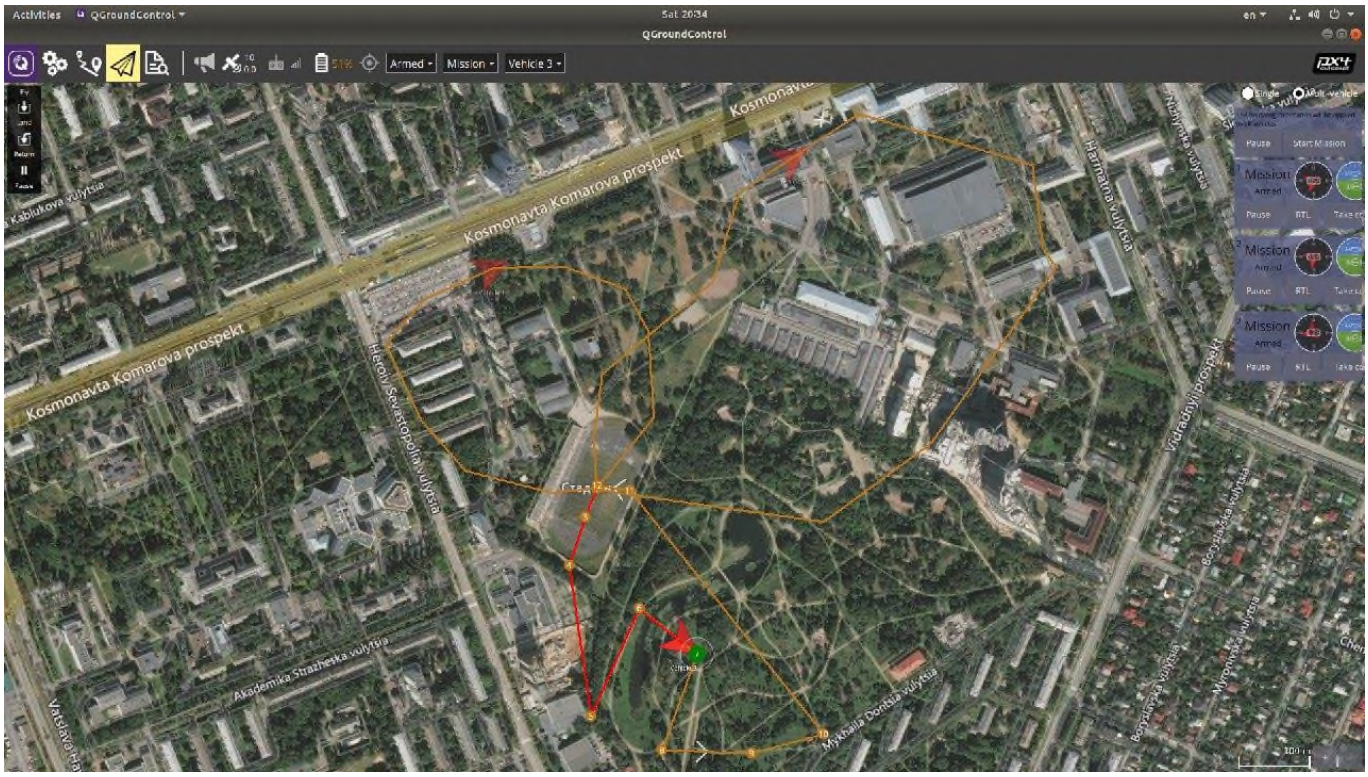

Рис. 3.14. Початок руху дронів

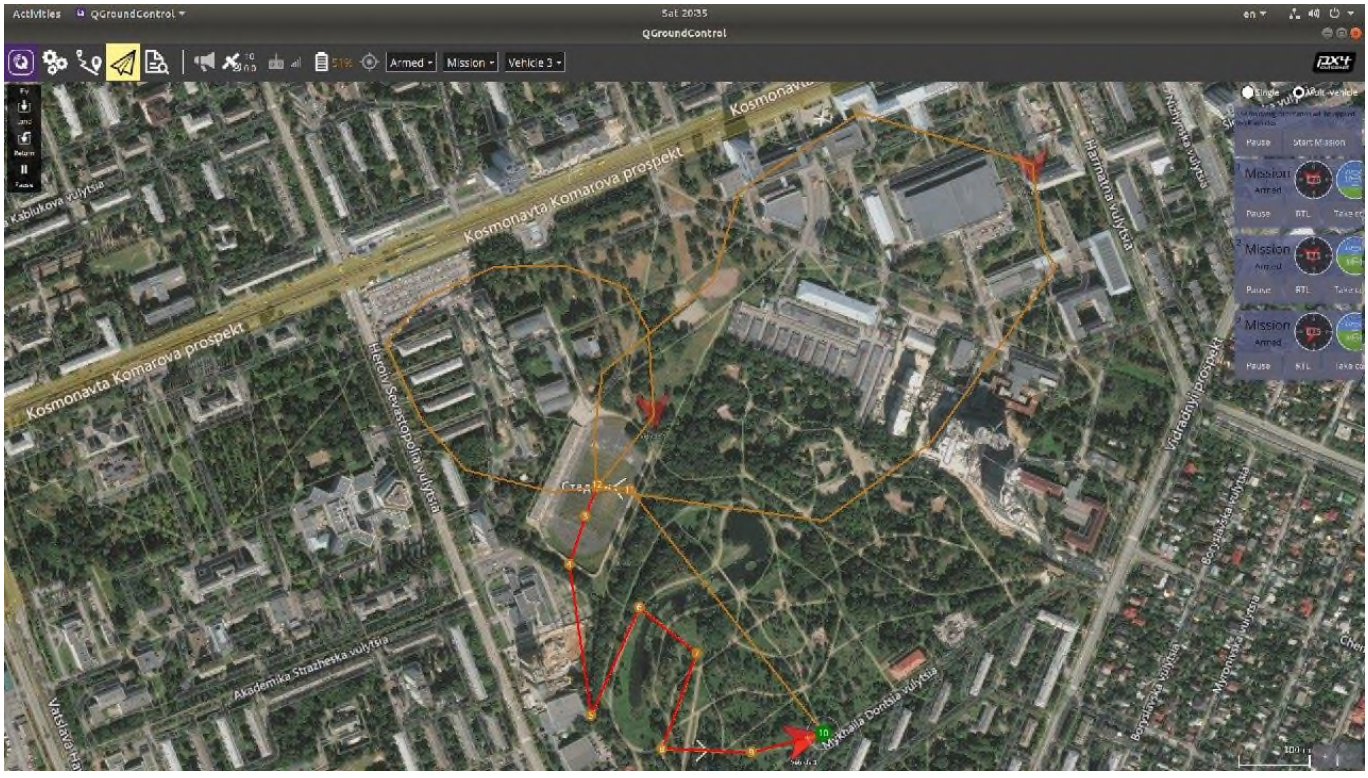

Рис. 3.15. Руху дронів

Також рух дронів видно в єкранах симуляції на рисунку 3.16.

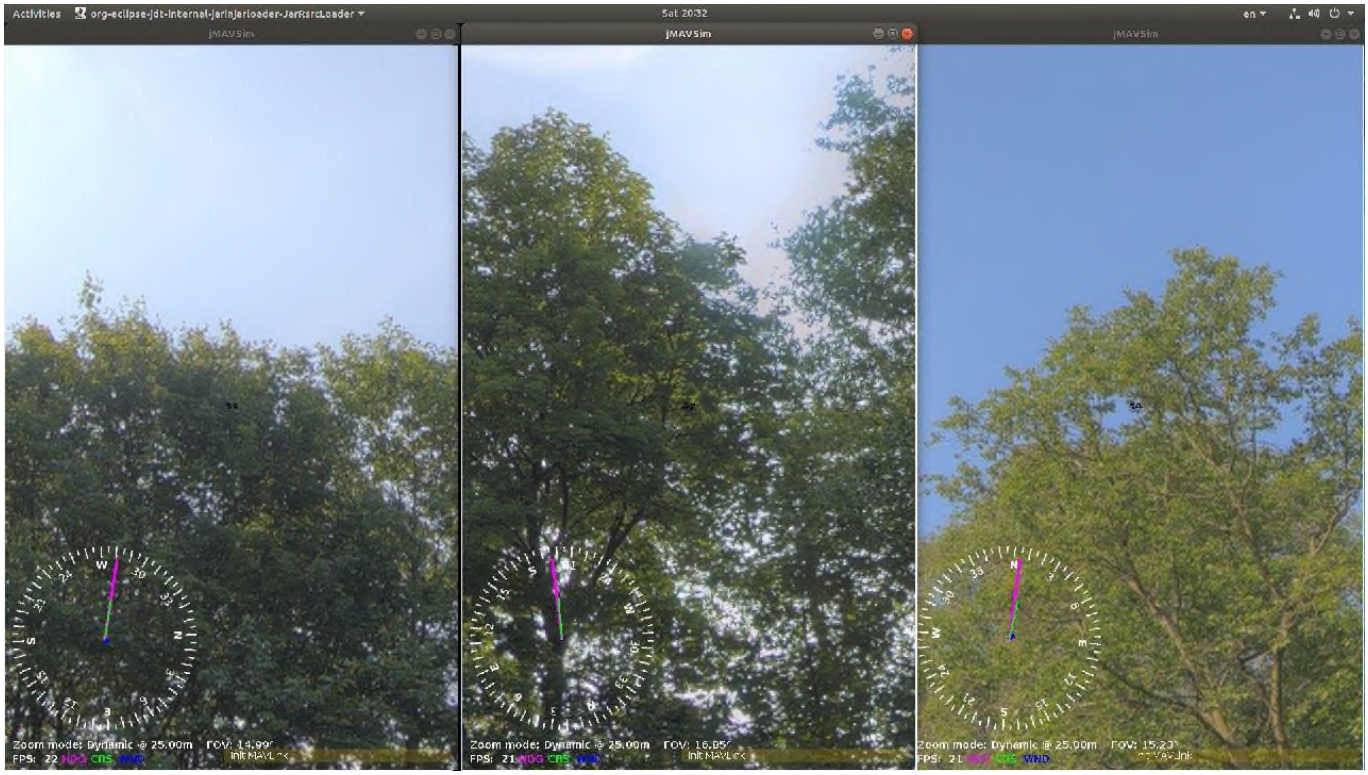

Рис. 3.16. Відображення дронів в *PX4 Autopiliot*

Після виконання дронами своїх маршрутів вони повертаються назад на початкове положення. Повні маршрути всіх трьох дронів показано на малюнку 3.17 знизу.

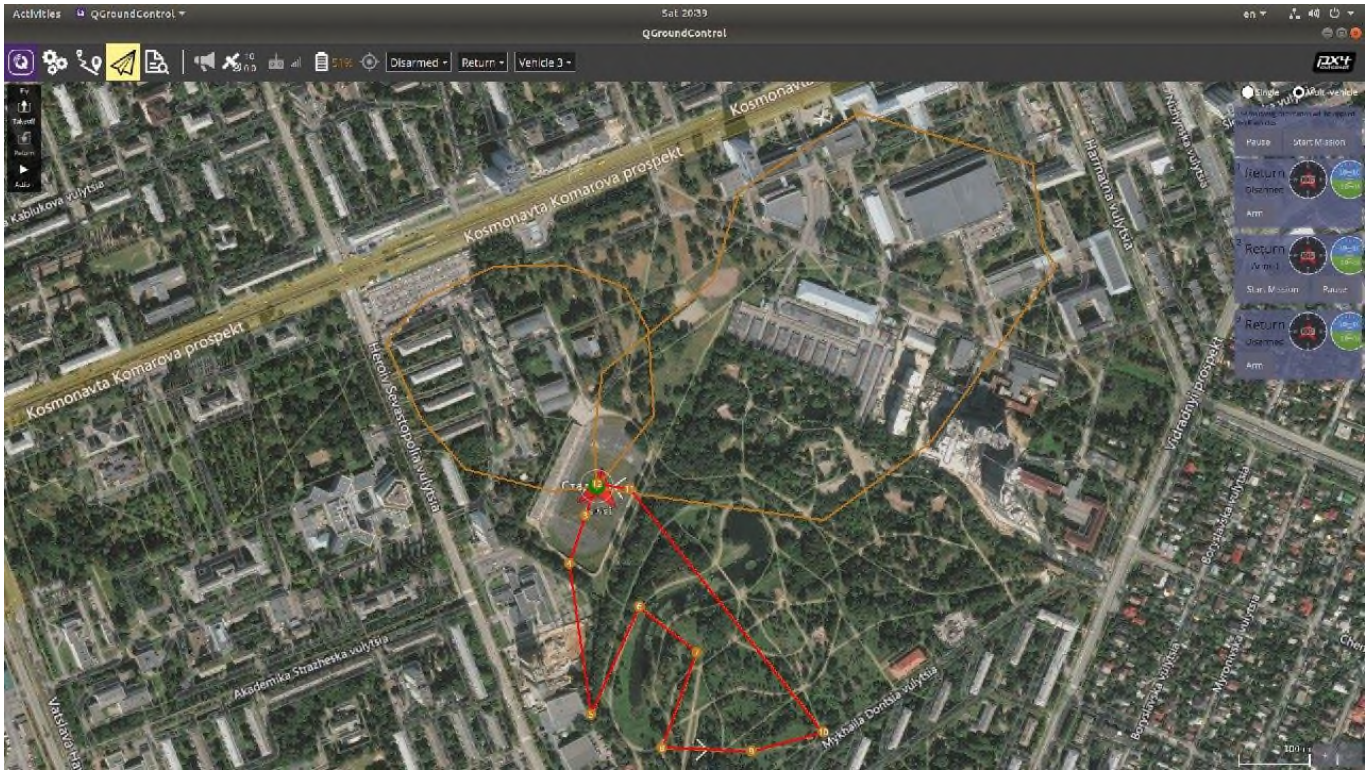

Рис. 3.17. Повні маршрути руху дронів

Виконавши всі завдання програмний модуль завершує свою роботу записавши всі дані в лог зображений на малюнку 3.18.

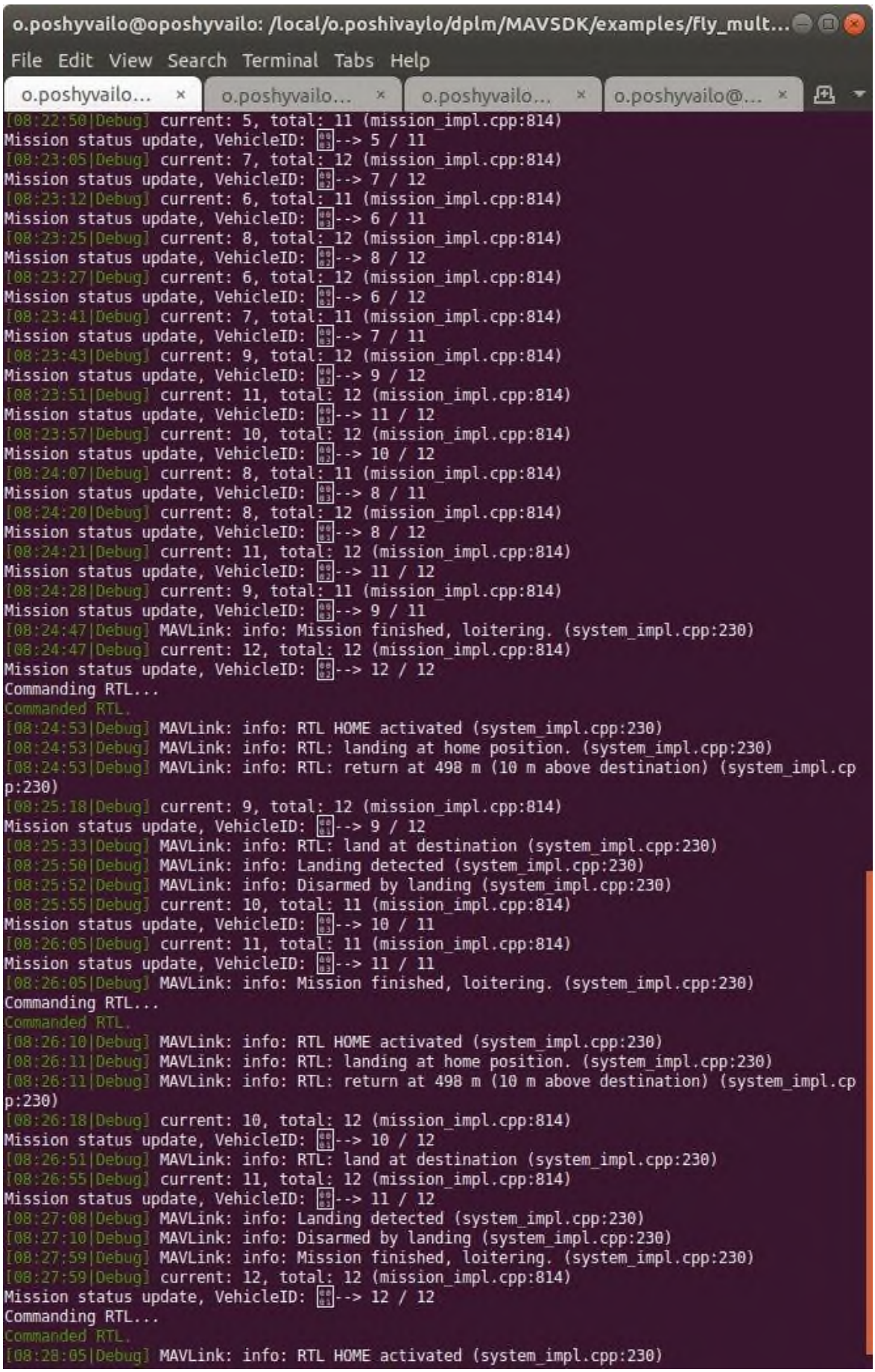

Рис. 3.18. Лог завершення програмного модулю

Кожен з дронів подолав заданий йому маршрут то повернувся до свого початкового положення. Тому можна вважати, що тестування програмного модулю пройшло успішно.

3.4. Висновки до розділу

В третьому розілі дипломної роботи було розроблено та протестовано програмний модуль управління рухом групи дистанційно керованих літальних апаратів.

Для технічної реалізації була використана бібліотека *Dronecode SDK*. Це бібліотека *MAVLink* для стеку польотів *PX4* з *API* для *C++* та *iOS*. Бібліотека забезпечує простий *API* для управління одним або декількома транспортними засобами, забезпечуючи програмний доступ до інформації про транспортні засоби та телеметрії, а також контроль за місіями, пересуванням та іншими операціями. Бібліотека може працювати на супутниковому комп'ютері на транспортному засобі або на наземному *GCS* або мобільному пристрої (ці пристрої мають значно більшу обчислювальну потужність, ніж звичайний контролер польоту, дозволяючи використовувати такі засоби, як комп'ютерний зір, уникнення перешкод і планування маршруту). Розробники можуть розширити основний *C++ SDK* за допомогою плагінів, щоб додати будь-який інший необхідний *API MAVLink* (наприклад, інтегрувати *PX4* із користувацькими камерами, карданними підключеннями чи іншим обладнанням через *MAVLink*).

Для тестування програмного модулю було використано програмне задезпеченяя *QGroundControl*, за допомогою якого було відображенно рух безпілотних апаратів. *QGroundControl* добре працює на будь-якому сучасному комп'ютері чи мобільному пристрої.

В якості дронів були виористані програмні симуляції програми *PX4 Autopilot* яка дозволяє створювати імітації багатьох апаратів.

Для тестового завдання будо запущенно три дрони, що виконали свох завдання облетівши задані маршрути над територією Національного Авіаційного

Університету. Після завершення маршруту кожен дрон успішно повернувся до свого початкового положення. Отже можна вважати, що програмний модуль працює коректно та тестування пройшло вдало.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було створено програмний модуль управління рухом групи дистанційно керованих літальних апаратів.

В першому розділі дипломної роботи було проведено дослідження актуальності застосування груп безпілотних літальних апаратів. Після ознайомлення зі всіма матеріалами можна зробити висновки, що дрони, які також називаються безпілотними літальними апаратами (БпЛА), не мають на борту людського пілота, і натомість вони або управляються людиною на землі, або автономно за допомогою комп'ютерної програми. БпЛА стають все більш популярними не лише для військових цілей, але й для багатьох інших сфер, починаючи від досліджень дикої природи та атмосфери, закінчуючи ліквідацією наслідків стихійних лих та спортивною фотографією. Безпілотники стають очима та вухами вчених, обстежуючи місце для археологічних розкопок, ознак незаконного полювання та пошкодження врожаю, і навіть знаходячись всередині ураганів для вивчення диких штормів.

На багатьох безпілотних літальних апаратах є такі особливості:

– Конструкція квадрокоптера: ця конструкція використовує чотири вертолітних ротора або гвинти для забезпечення контролю підйому та напрямку.
– Виділений контролер: ці пристрої використовують радіосигнали для передачі команд на безпілотник, і, як правило, живляться від акумуляторних батарей.
– Акумуляторні батареї: є знімними та заряджаються за допомогою адаптера, який підключається до електричної розетки, як- порт *USB* або настінна розетка.
– Додаткові гвинти: навіть найдорожчі безпілотники часто поставляються з одним або декількома повними комплектами змінних гвинтів.
– Система управління польотом.
– Мінімальний захист від води: електроніка в більшості споживчих безпілотних літальних апаратів та їх контролерів безпілотних літальних

апаратів не захищена від пошкодження водою, тому переліт ними в дощові умови може призвести до серйозних електричних проблем.

У другому розділі дипломної роботи було розлянуто основні алгоритми, що використовуються для групового контролю безпілотних апаратів. Найцікавішим можна видиліти мурашковий алгоритм – це клас алгоритмів оптимізації, змодельований на основі дії колонії мурах. Штучні "мурахи" (наприклад, імітаційні агенти) знаходять оптимальні рішення, рухаючись по простору параметрів, що представляє всі можливі рішення. Справжні мурахи відкладають феромони, спрямовуючи один одного на ресурси, досліджуючи навколишнє середовище. Модельовані «мурахи» аналогічним чином фіксують свої позиції та якість своїх рішень, так що в подальших ітераціях моделювання більше мурашок знаходить кращі рішення. Одним із варіантів цього підходу є алгоритм бджіл, який є більш аналогічним шаблонам пошуку медоносної бджоли, іншої соціальної комахи.

В третьому розілі дипломної роботи було розроблено та протестовано програмний модуль управління рухом групи дистанційно керованих літальних апаратів.

Для технічної реалізації була використана бібліотека *Dronecode SDK*. Це бібліотека *MAVLink* для стеку польотів *PX4* з *API* для *C++* та *iOS*. Бібліотека забезпечує простий *API* для управління одним або декількома транспортними засобами, забезпечуючи програмний доступ до інформації про транспортні засоби та телеметрії, а також контроль за місіями, пересуванням та іншими операціями. Бібліотека може працювати на супутниковому комп’ютері на транспортному засобі або на наземному *GCS* або мобільному пристрої (ці пристрої мають значно більшу обчислювальну потужність, ніж звичайний контролер польоту, дозволяючи використовувати такі засоби, як комп’ютерний зір, уникнення перешкод і планування маршруту). Розробники можуть розширити основний *C++ SDK* за допомогою плагінів, щоб додати будь-який інший необхідний *API MAVLink* (наприклад, інтегрувати *PX4* із користувацькими камерами, карданними підключеннями чи іншим обладнанням через *MAVLink*).

Для тестування програмного модулю було використано програмне задезпеченяя *QGroundControl*, за допомогою якого було відображенно рух безпілотних апаратів. *QGroundControl* добре працює на будь-якому сучасному комп’ютері чи мобільному пристрої.

В якості дронів були виористані програмні симуляції програми *PX4 Autopilot* яка дозволяє створювати імітації багатьох апаратів.

Для тестового завдання будо запущенно три дрони, що виконали свох завдання облетівши задані маршрути над територією Національного Авіаційного Університету. Після завершення маршруту кожен дрон успішно повернувся до свого початкового положення. Отже можна вважати, що програмний модуль працює коректно та тестування пройшло вдало.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *"Uncrewed Aircraft Systems (UAS)". Retrieved 15 May 2019.*

2. Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов : справ. пособ. / А. Г. Гребенников, А. К. Мялица, В. В. Парфенюк и др. – Х. : Нац. аэрокосм. ун–т "Харьк. авиац. ин–т", 2008. – 377 с.

3. *Autonomous Flying Robots. Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles / Kenzo Nonami, Farid Kendoul, Satoshi Suzuki and other. − Springer Tokyo, New York*, 2010. − 348 p.

4. *International Civil Aviation Organozation. CIR* 328. Беспилотные авиационные системы (БАС). − ИКАО, 2011. − 326 с.

5. *Tice, Brian P. (Spring 1991). "Unmanned Aerial Vehicles – The Force Multiplier of the 1990s". Airpower Journal. Archived from the original on 24 July 2009. Retrieved 6 June 2013. When used, UAVs should generally perform missions characterized by the three Ds: dull, dirty, and dangerous.*

6. Слюсар, Вадим. (2013). Радиолинии связи с БпЛА: примеры реализации.. Электроника: наука, технология, бизнес. – 2010. – № 5. с. С. 56 – 60.

7. Війна дронів. Як волонтери постачають українські війська безпілотниками і створюють власний апарат. *Texty.org.ua.* 12 вересня 2014.

8. *Parsch, A., Directory of U.S. Military Rockets and Missiles Appendix 4: Undesignated , Coyote Vehicles*, 2006,

9. *"Drones and Artificial Intelligence". Drone Industry Insights. 28 August 2018. Retrieved 11 April 2020.*

10. *Drew, Christopher (March 16, 2009). Drones Are Weapons of Choice in Fighting Qaeda. New York Times. March 17, 2009. «Considered a novelty a few years ago, the Air Force's fleet has grown to 195 Predators and 28 Reapers, a new and more heavily armed cousin of the Predator.»*

11. *Dubins L.E. On curves of minimal lengthwith a constrainton overage curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents / Dubins L.E. // AM. J. Math*. – 1957. – 79. – P. 497–516.

12. Українська радянська енциклопедія, перше видання

13. М. К. Філяшкін канд. техн. наук, проф., А. А. Закордонець. Алгоритм роботи адаптивної системи керування бічним рухом безпілотних літальних апаратів на етапі виходу на задану лінію шляху

14. *Five UK cities selected to develop future of drone operations. sUAS News website*, 2018.

15. *Koparan, Cengiz; Koc, Ali Bulent; Privette, Charles V.; Sawyer, Calvin B. (March 2018). "In Situ Water Quality Measurements Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) System". Water. 10 (3): 264. doi:10.3390/w10030264.*

16. *Koparan, Cengiz; Koc, Ali Bulent; Privette, Charles V.; Sawyer, Calvin B.; Sharp, Julia L. (May 2018). "Evaluation of a UAV–Assisted Autonomous Water Sampling". Water. 10 (5): 655. doi:10.3390/w10050655.*

17. Электросети (ЛЭП) *Zala Aero Group*, 2018.

18. *Baxter J. W. Fly–by–Agent: Controlling a Pool of UAVs via a Multi–Agent System / J. W. Baxter, G. S. Horn, D. P. Leivers. // QinetiQ Ltd Malvern Technology Centre St Andrews Road*. – 2007.

19. *Sharma, Abhishek; Basnayaka, Chathuranga M.Wijerathna; Jayakody, Dushantha Nalin K. (May 2020). "Communication and networking technologies for UAVs: A survey". Journal of Network and Computer Applications. 168: 102739.*

20. Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов / К. С.Амелин, Е. И. Антал, В. И. Васильев, Н. О. Граничина. // СПГУ. – 2009. – С. 160–161.

21. *Dronecore*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: *http://dronecore.org*

22. *Github*. [Електронний ресурс]. –Режими доступу: *https://github.com/PX4/Firmware/tree/master/src/modules*

23. *PX4_Autopilot*. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: *http://dev.px4.io/en/concepts/acritecture.html*

24. *BBC Graphic — Great Turning Points in Aviation. BBC World Service web–site, 15 січня 2015*

25. *Remote Piloted Aerial Vehicles : An Anthology (англ.). Centre for Telecommunications and Information Engineering (Monash University).*

26. *Gunther Sollinger. The Development of Unmanned Aerial Vehicles in Germany (1914 – 1918) // Scientific Journal of Riga Technical University. — 2010. — № 16.*

27. *John F. Keane, Stephen S. Carr. A Brief History of Early Unmanned Aircraft // Johns Hopkins APL Technial Digest. — 2013. — Т. 32, № 3.*

28. Л. А. Халіновська (2013). ВЕРТОЛІТ, ГЕЛІКОПТЕР ЧИ ГВИНТОКРИЛ? Термінологічний вісник 2013, вип. 2(2).

29. *"State government gears up for autonomous RPAS mapping". 23 January 2017.*

30. *Guilmartin, John F. "unmanned aerial vehicle". Encyclopedia Britannica. Retrieved 24 March 2020.*

31. *"How Autonomous Drone Flights Will Go Beyond Line of Sight". Nanalyze. 31 December 2019.*

32. *Dunstan, Simon (2013). Israeli Fortifications of the October War 1973. Osprey Publishing. p. 16.*