

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ НАЯВНОСТІ ШКІДЛИВИХ ТА
ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ НА ОСНОВІ МІНІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

**А.Г. Ткачук
А.В. Коваль
А.А. Гуменюк
М.В. Богдановський**

**А.Г. Ткачук
А.В. Коваль
А.А. Гуменюк
М.В. Богдановський**

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ
НАЯВНОСТІ ШКІДЛИВИХ ТА
ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ НА ОСНОВІ
МІНІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

А. Г. Ткачук
А. В. Коваль
А. А. Гуменюк
М. В. Богдановський

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ
НА ЯВНОСТІ ШКІДЛИВИХ ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ
ГАЗІВ НА ОСНОВІ МІНІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ
АПАРАТІВ

Монографія

Житомир
Державний університет
«Житомирська політехніка»
2021

УДК 681.5:621.317:629.7
A18

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Державного університету
«Житомирська політехніка»
(протокол № 5 від 24.09.2021 р.)*

Рецензенти:

Кузь Микола Васильович

д.т.н., доц., професор кафедри інформаційних технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника;

Квасніков Володимир Павлович

д.т.н., проф., завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету;

Москвін Павло Петрович

д.ф-м.н., проф., завідувач кафедри фізики та вищої математики Державного університету «Житомирська політехніка»

- A18 Автоматизована система моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на основі міні безпілотних літальних апаратів: монографія / А.Г. Ткачук, А.В. Коваль, А.А. Гуменюк, М.В. Богдановський. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. – 141 с. : 82 іл.; 7 табл.; бібліогр. 148 назв.
ISBN 978-966-683-582-9

У монографії викладено дослідження галузей застосування міні безпілотних літальних апаратів (мБПЛА) та основні методи вимірювання витоків шкідливих для здоров'я людини та вибухонебезпечних газів. Спроектовано нову автоматизовану систему моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на основі міні безпілотних літальних апаратів. Обґрунтовано конструкційний тип мБПЛА, розраховано його автономність та вантажопідйомність. Визначено математичні моделі датчиків газу та розроблено програмне забезпечення для обробки результатів моніторингу. Сконструйовано мБПЛА із системою моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів та приведено результати експериментальних досліджень. Розроблено систему побудови діаграм забрудненості шкідливими та вибухонебезпечними газами.

Призначена для магістрантів, аспірантів, докторантів, викладачів ЗВО та спеціалістів наукових підрозділів і установ НАН України та інших наукових організацій.

УДК 681.5:621.317:629.7

ISBN 978-966-683-582-9

© А.Г. Ткачук, 2021

© А.В. Коваль, 2021

© А.А. Гуменюк, 2021

© М.В. Богдановський, 2021

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБОК У ГАЛУЗІ СТВОРЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ПОШУКУ ГАЗІВ НА ОСНОВІ МІНІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	12
1.1. Области застосування газоаналізаторів.....	12
1.2. Обладнання, що найчастіше застосовується в системах газоаналізу.....	17
1.3. Безпілотні літальні апарати як платформа для досліджень якості повітря	20
1.3.1. Вивчення атмосферного складу і забрудненості повітря та зміни клімату	22
1.3.2. Вимірювання вектору вітру.....	22
1.3.3. Збір даних про атмосферні аерозолі.....	24
1.3.4. Вимірювання парникових газів та інших газоподібних забруднювачів..	30
2. СТРУКТУРА ТА КОНФІГУРАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАЯВНОСТІ ШКІДЛИВИХ ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ НА ОСНОВІ МІНІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	37
2.1. Архітектура міні безпілотного літального апарату для моніторингу наявності газів.....	37
2.2. Навігація та автопілот.....	39
2.3. Бортове обладнання міні безпілотного літального апарату.....	39
2.3.1. Застосування на відкритій місцевості.....	40
2.3.2. Застосування у приміщеннях.....	40
2.4. Датчики вимірювальної системи, алгоритми та схеми вимірювань.....	41
2.4.1. Отримання даних про якість повітря.....	42
2.5. Розробка функціональної та структурної схем запропонованої системи...	47
2.6. Планування експериментальних досліджень	49
3. ВИБІР ТА МОНТАЖ СКЛАДОВИХ МІНІ БПЛА.....	50
3.1. Рама квадрокоптера.....	50
3.2. Регулятори ходу.....	51

3.3. Акумулятор.....	52
3.4. Вибір двигунів.....	54
3.5. Польотний контролер.....	55
3.6. Апаратура управління.....	58
3.7. Пропелери.....	59
3.8. Збір рами та пропаювання плати розподілу живлення.....	61
3.9. Розміщення двигунів та їх підключення до контролерів швидкості.....	62
3.10. Підготовка та розміщення акумулятора.....	63
3.11. Монтування антивібраційної платформи та кріплення контролера польоту.....	64
3.12. Налаштування та підключення приймача радіоуправління.....	65
3.13. Підключення контролерів швидкості з відповідними двигунами до контролера польоту.....	66
3.14. Монтаж пропелерів	67
4. СТАБІЛІЗАЦІЯ КВАДРОКОПТЕРА ТА НАЛАШТУВАННЯ ПІД РЕГУЛЯТОРА.....	69
4.1. Початкові налаштування та встановлення ОС на Pixhawk.....	69
4.2. Налаштування датчиків польотного контролера.....	70
4.3. Налаштування Failsafe та програмування регуляторів ходу.....	77
4.4. Налаштування системи керування орієнтацією мБПЛА	79
5. АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА РОЗРОБКА БЛОКУ ВИЯВЛЕННЯ ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ.....	85
5.1. Датчики системи газоаналізу.....	85
5.2. Підключення датчиків до плати Arduino та їх програмування	91
5.3. Обробка даних з датчиків MQ-5 та MQ-9.....	93
5.4. Розробка корпусу блоку газоаналізу та аналіз його розміщення на корпусі міні БПЛА.....	96
5.5. ROS та інші програмні компоненти	103
5.5.1. Вимірювальна плата	103

	5
5.5.2. Реєстрація льотної інформації	104
5.5.3. Побудова мапи газу	105
6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ.....	113
6.1. Статичний експеримент	113
6.2. Льотний експеримент	119
ВИСНОВКИ.....	121
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	123

ВСТУП

Склад навколишнього повітря постійно змінюється через природні та антропогенні викиди, які, з'являючись в атмосфері як аерозолі або газоподібні забруднювачі, що надходять від дорожнього руху та промисловості, впливають на якість повітря та здоров'я людей [1, 30]. Забруднення атмосфери також знижує врожайність, видимість, кількість сонячного світла на поверхні Землі [5,6]. Ці впливи підкреслюють необхідність постійної оцінки якості повітря.

Детальна інформація про характеристики розподілу аерозолів та концентрації газоподібних забруднюючих речовин необхідна для кількісного визначення їх впливу на здоров'я людини та навколишнє середовище [7-11]. Проте, просторовий та часовий розподіл даних від наземних, пілотованих літальних апаратів [7,12-20] та супутникових вимірювань є, зазвичай, неадекватним для місцевих та регіональних потреб. На додачу до цього, супутникові та повітряні вимірювання є надзвичайно дорогими, що обмежує їх використання для таких вимірювань. Крім того, проведення вимірювань безпосередньо біля місць забруднення є не завжди можливим і це може бути надто небезпечним або ризикованим для експериментальних пілотованих апаратів, що літають на низьких висотах [21-24].

Інтерес у використанні безпілотних літальних апаратів, або ж простіше – дронів, у багатьох різноманітних сферах діяльності людини не припиняє зростати. БПЛА – мобільний автономний апарат, який є різновидом літаючих роботів з можливістю передачі часткового або повного управління людині та запрограмований на виконання певних завдань, таких як: спостереження, дистанційне зондування, картографія, пошук і порятунок, тощо.

Одним із найперспективніших напрямків цивільних застосувань безпілотних літальних апаратів є моніторинг витоків газу. Це спричиняє велику кількість досліджень у цій галузі, які умовно можна поділити на

моніторинг якості внутрішнього та зовнішнього повітря. Серед яких моніторинг якості повітря у приміщенні є менш вивченою областю.

БПЛА можуть сканувати великі території і, особливо, працювати у небезпечних або важкодоступних місцях, збільшуючи експлуатаційну гнучкість та спектр завдань [28-30].

Технічно БПЛА є універсальнішим у порівнянні з наземними роботами, пілотованими літаками та супутниками. Проведення атмосферних вимірювань у віддалених місцях є випадком, коли використання міні БПЛА є особливо доцільним [31,32]. Проте, побудова такого роду систем не можлива без використання сучасних засобів автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Вагомий внесок у створення подібних систем та розвиток методів і засобів їх побудови внесли роботи таких вітчизняних та закордонних вчених: Д. Санз, А. Барріентос, Н. Герхард, Г. Вайлд, Т. Керсновські, Ф. Гонзалез, К. Мортон, М. Россі, Д. Брунеллі та ін. Аналіз їх робіт показав, що вони направлені, в основному, на розробку самого БПЛА, аналіз та оптимізацію маршруту сканування місцевості, розміщення системи газоаналізу на корпусі дрона.

Різноманітність умов і особливостей середовища, в якому проводиться визначення наявності шкідливих газів, вимагає індивідуальну розробку сценаріїв для здійснення моніторингу. Потрібно враховувати те, що система виявлення повинна задовольняти таким вимогам як: автономність, надійність, точність, простота у базуванні та розгортанні на місцевості. Крім того, необхідною вимогою є можливість переведення БПЛА у режим ручного керування.

Безпілотні літальні апарати охоплюють широкий діапазон різних платформ, які, завдяки своєму розміру та потужності, мають різні можливості та, крім цього, є простими в експлуатації та не створюють небезпеки для життя оператора. Ці фактори впливають на вантажопідйомність, швидкість, висоту та діапазон місій, що визначає різні програми, які можуть виконуватися кожним

типом БПЛА. На рис.1 показані типові міні БПЛА. Деякі класифікації платформ вже були запропоновані, однак, номенклатура, прийнята для цивільного та наукового використання, загалом дотримувалася існуючих військових характеристик величини, витривалості польоту та можливостей [33-35].



(a) CyberEye II



(b) SilverTone
Flamingo



(c) SenseFly
Swinglet



(d) AscTec Pelican



(e) DJI F550



(f) DJI S800

Рис. 1. Приклади міні БПЛА: (a) CyberEye II [36]; (b) SilverTone Flamingo [37]; (c) SenseFly Swinglet [38]; (d) AscTec Pelican [39]; (e) DJI F550 [40]; (f) DJI S800 [41]

Незважаючи на те, що міні БПЛА мають значні обмеження по вантажопідйомності, вони мають явні переваги з точки зору відносно низької вартості платформи, здатності виконувати автономні польоти від зльоту до посадки та літати близько до землі без ризику для оператора [42]. Заздалегідь запрограмовані плани польоту автоматично контролюються на борту, що означає, що БПЛА можуть слідувати траєкторії з більшою точністю та меншою завантаженістю, ніж літаки керувані пілотами. Деякі платформи навіть мають можливість працювати в середовищах без GPS навігації та дотримуватися місцевої інфраструктури [43], і, таким чином, можуть

забезпечити ефективний та точний моніторинг всередині будівель, лісів або каньйонів [44].

Ефективність та функціональність БПЛА тісно пов'язані з розмірами апарату, тому невеликі дешеві літаки, по суті, мають обмеження по вантажопідйомності, швидкості, потужності та витривалості. Тобто вони обмежені у кількості споряджених датчиків (обладнання), що відповідно впливає і на тривалість польоту. Наприклад, розміри та форма БПЛА (Рис. 1f) можуть ускладнити встановлення датчиків, живлення повинно передаватись усьому обладнанню в залежності від енергоспоживання двигунів. Таким чином, може знадобитися велика кількість енергії, що зменшить час польоту та кількість зібраних даних. Такі платформи типово використовуються у завданнях пошуку, що зумовлено можливістю руху по траєкторії з невисокою швидкістю та дозволяє забезпечити просторову щільність зібраних даних, що часто необхідно для перевірок на конкретній ділянці [45-47].

Більші БПЛА або дрони мають менш жорсткі обмеження по вантажопідйомності і можуть забезпечити збільшення кількості та різноманітності бортових датчиків та обладнання. Міністерством оборони США виділяється п'ять основних груп БПЛА, як показано в Таблиці 1 [31].

На сьогоднішній день БПЛА обладнані невеликими та легкими камерами з видимим спектром або, у деяких випадках, інфрачервоними камерами для проведення вимірювань якості повітря [33]. Чвалеба та інші [48] розглянули оптичні датчики, для моніторингу забруднення повітря. Вони класифікували датчики світлопоглинання та відстані (LIDAR), як кращі оптичні пристрої, що будуть використовуватися як корисне навантаження для моніторингу якості повітря. Залежно від використовуваних датчиків, декілька наборів даних можуть бути зібрані з високою просторовою та тимчасовою роздільною здатністю [33,49,50]. Проте, більша складність та функціональність, потребує додаткового технічного обслуговування, а також додаткових навичок спеціалістів.

Таблиця 1

Класифікація БПЛА, що використовується Міністерством оборони США [31]

Категорія БПЛА	Максимальна злітна вага	Робоча висота	Швидкість
Група 1	<20 фунтів (9.07 кг)	<1200 футів (365.76 метрів) вище рівня землі	<100 вузлів (<185.20 км/год)
Група 2	21–55 фунтів (9.53–24.95 кг)	<3500 футів (1066.8 метрів) вище рівня землі	<250 вузлів (<463.00 км/год)
Група 3	<1320 фунтів (<598.74 кг)	<18000 футів (5486.4 метрів)	Будь-яка швидкість
Група 4	>1320 фунтів	середньоморський рівень	
Група 5		>18000 футів середньоморський рівень	
Примітка: якщо БПЛА має одну характеристику наступного вищого рівня, вона класифікується як частина цієї групи.			

Більші платформи є дорожчими та вимагають значних фінансових інвестицій. Можливо, найбільш важливим параметром є безпека використання таких платформ у комерційних цілях, оскільки вони можуть завдати значних збитків (людям та власності), і тому підпадають під жорсткіші інструкції з експлуатації, ніж менші БПЛА [51,52].

1. АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБОК У ГАЛУЗІ СТВОРЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ПОШУКУ ГАЗІВ НА ОСНОВІ МІНІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1. Области застосування газоаналізаторів.

В більшості галузей промисловості в різних технологічних процесах часто застосовуються гази, що вимагають постійного контролю відсутності витоків з метою забезпечення безпеки виробництва та зниження ризиків для персоналу. Для цього встановлюють системи виявлення газів для постійного контролю рівня робочого середовища [139].

Ці системи, що складаються з детекторів газу (газоаналізаторів), контролерів, пристроїв оповіщення та виконавчих пристроїв, виконують функції раннього попередження про розвиток небезпечної ситуації. Тим самим системи виявлення газів дозволяють локалізувати розвиток небезпечних ситуацій на ранніх стадіях, а також збільшують період часу для прийняття відповідних захисних заходів і дій по усуненню аварійних ситуацій.

Щоб системи контролю загазованості мали максимальну ефективність, при їх проектуванні необхідно враховувати специфіку конкретного технологічного процесу даної галузі виробництва. Оскільки універсального рішення з побудови систем детектування газів для різних галузей промисловості не існує, кожен випадок унікальний і вимагає індивідуального підходу з точки зору архітектури побудови систем безпеки, вибору числа точок контролю загазованості та переліком газів, що детектуються [139].

Нафтогазова промисловість. Нафтогазова промисловість включає в себе велику кількість напрямків виробничої діяльності: від розвідки на суші і на шельфі, виробництва нафти і газу і до їх транспортування, зберігання і перегонки. Дані види діяльності характеризуються наявністю великої кількості вогнебезпечних газоподібних вуглеводнів, які представляють собою серйозну небезпеку. Горючі гази часто супроводжують так само токсичні гази, такі, наприклад, як сірководень.

Типові об'єкти, що вимагають контролю загазованості:

- розвідницькі бурові установки;
- експлуатаційні платформи;
- наземні нафто- та газосховища;
- нафтопереробні заводи.

Гази, що контролюються:

- Горючі: вуглеводневі гази.
- Токсичні: сірководень, чадний газ [139,140].

Хімічна промисловість. Підприємства хімічної промисловості, можливо, є найбільшими споживачами різного устаткування для виявлення газу. Вони часто застосовують широкий діапазон горючих та токсичних газів в своїх технологічних процесах або створюють їх у вигляді побічних продуктів виробничих процесів.

Типові об'єкти, що вимагають контролю загазованості:

- сховища сировини і готової продукції;
- виробничі зони;
- лабораторії;
- насосні станції;
- компресорні станції;
- зони завантаження / розвантаження сировини і готової продукції.

Контрольовані гази:

- Горючі: звичайні вуглеводні.
- Токсичні: сірководень, фтороводень, аміак, дефіцит кисню [139].

Теплові електростанції. В якості основного палива на електростанціях зазвичай використовуються природний газ, вугілля та нафтопродукти. При спалюванні палива з причини неповного згоряння палива, наявності витоків в арматурі та з'єднаннях газопроводів або топок котлів, можливе виділення в повітря робочої зони продуктів горіння і палива, що не згоріло.

Типові об'єкти, що вимагають контролю загазованості:

- простір поблизу топок і трубопроводів в котельнях;
- простір всередині і навколо корпусів турбін;
- в бункерах і стрічкових транспортерах для вугілля (на електростанціях, що працюють на вугіллі).

Контрольовані гази:

- Горючі: природний газ, метан, водень, пари вуглеводнів.
- Токсичні: чадний газ, оксиди сірки і азоту SO_x, NO_x та дефіцит кисню [139].

Машинно-котельні відділення. Машинно-котельні відділення бувають всіх можливих форм і розмірів. У невеликих будинках є прості котельні, в той час як у великих будинках часто можна зустріти машинно-котельні відділення з декількох котелень.

Типові об'єкти, що вимагають контролю загазованості:

- витік горючого газу з прийомних газопроводів;
- витік з котельні і навколишнього газопроводу;
- чадний газ в котельнях, що знаходяться поганому технічному стані.

Контрольовані гази:

- Горючі: метан.
- Токсичні: чадний газ.

Станції очистки стічних вод. Каналізаційні стоки рясно виділяють метан і сірководень. Запах тухлих яєць, властивий сірководню, часто відчувається ще на під'їздах до станції очистки, так як нюх людини дозволяє вловити наявність сірководню в повітрі при його концентрації менше 0,1 частини сірководню на мільйон частин повітря (0,1 ppm) [140,142].

Типові об'єкти, що вимагають контролю загазованості:

- автоклави;
- заводські відстійники;
- скрубери H₂S;
- насосні станції.

Контрольовані гази:

- Горючі: метан, пари розчинників.
- Токсичні: сірководень, вуглекислий газ, хлор, діоксид сірки, озон.

Автомобільні тунелі і закриті автостоянки. Автомобільні тунелі і закриті автостоянки вимагають відстеження токсичних вихлопних газів. Сучасні тунелі і автостоянки використовують подібний моніторинг для управління вентиляційними установками, які здійснюють провітрювання цих споруд. У підземних тунелях може також здійснюватися контроль наявності природного газу, який може виділятися в тунель з товщі гірської породи, в якій прокладено даний тунель.

Типові об'єкти, що вимагають контролю загазованості:

- автомобільні тунелі;
- підземні і закриті автостоянки;
- підхідні тунелі;
- управління вентиляцією.

Контрольовані гази:

- Горючі: метан (природний газ), зріджений нафтовий газ, зріджений природний газ, пари бензину.
- Токсичні: чадний газ, діоксид азоту [141,142].

Виробництво напівпровідникових матеріалів. При виробництві напівпровідникових матеріалів використовуються високотоксичні речовини і горючі гази. Токсичні фосфор, миш'як, бор і галій зазвичай застосовуються в якості легуючих домішок. Горючий водень використовується як в якості реагенту, так і газу-носія відновлювального середовища. Травильні і освітлюючі гази містять NF₃ і інші перфторовані суміші.

Типові об'єкти, що вимагають контролю загазованості:

- реактор напівпровідникових пластин;
- установка сушіння напівпровідникових пластин;
- газові шафи;

- установка хімічного осадження з парової фази.

Контрольовані гази:

- Горючі: водень, ізопропанол, метан, пропан.
- Токсичні: HCl, AsH₃, BCl₃, PH₃, CO, HF, O₃, H₂Cl₂Si, TEOS, C₄F₆, C₅F₈, GeH₄, NH₃, NO₂ і дефіцит кисню.
- Самозаймисті: моносилан [142].

Медичні установи. Медичні установи застосовують горючі і токсичні речовини, перш за все, в своїх дослідницьких лабораторіях. Крім того, багато медичних установ у своєму розпорядженні мають місцеву енергосистему і аварійними генераторними станціями з запасом палива.

Типові об'єкти, що вимагають контролю загазованості:

- лабораторії;
- рефрижераторні установки;
- машинно-котельні відділення.

Контрольовані гази:

- Горючі: метан, водень, пари дизельного палива.
- Токсичні: чадний газ, хлор, аміак, етиленоксид і дефіцит кисню.

Застосування у виробничих процесах небезпечних речовин, зокрема легкозаймистих, токсичних і кисневмісних газів, вимагає постійного моніторингу ситуації. Адже, неминуче в ході порушення технології виробництва, виробничих аварій і інцидентів можуть траплятися витіки газів, які є потенційно небезпечними для промислового підприємства, екології, персоналу і людей, які проживають поблизу. Застосування систем виявлення газів дозволяє істотно знизити ризики і підвищити безпеку виробництва.

Саме тому слід розробити та запровадити систему, яка дасть змогу в повній мірі оцінювати газову обстановку у робочих зонах, передавати дані до автоматизованої системи управління та моніторингу, яка в свою чергу буде приймати рішення, щодо вентиляції приміщення, сповіщення персоналу та необхідності евакуації.

1.2. Обладнання, що найчастіше застосовується в системах газоаналізу

На підприємствах, що потребують постійного моніторингу газового стану, віддають перевагу у використанні нерухомих систем газоаналізу і управління по місцю можливого виникнення витоку. Вони передбачають розміщення датчиків безпосередньо у зонах де використовуються або зберігаються гази. [144]

Детектор газу – це пристрій, який слугує для виявлення якісного чи кількісного складу газової суміші. Часто виступає в якості складової частини газоаналізаторів чи газосигналізаторів. Цей тип пристрою є важливим, оскільки існує велика кількість газів, які можуть завдати шкоди людям чи тваринам.

Розрізняють датчики горючого газу, детектори фотоіонізації, інфрачервоні, ультразвукові, електрохімічні та напівпровідникові датчики газу. Детектори газу розробляються в двох основних форм-факторах: портативні та фіксовані пристрої.

Портативні детектори використовуються для контролю атмосфери навколо персоналу та можуть бути як ручними, так і носитись на одязі. Вони передають застереження через тактильні та видимі сигнали, такі як: вібрації та миготливі вогні, коли виявляють небезпечну концентрацію певних газів.

Детектори газу фіксованого типу можуть використовуватися для виявлення одного або декількох типів газів. Такі сенсори, як правило, встановлюються поблизу робочих зон, приміщень зберігання балонів з газовими сумішами. Як правило, промислові датчики встановлюються на сталеві конструкції фіксованого типу їх поєднують з системою SCADA для постійного моніторингу.

Електрохімічні датчики.

Електрохімічні датчики дозволяють визначати концентрацію газу в суміші за значенням електричної провідності розчину, який поглинув цей газ. Чутливим елементом датчика є електрохімічний сенсор, що складається з

трьох електродів, поміщених в посудину з електролітом. Чутливість до різних компонентів визначається матеріалом електродів і застосовуваним електролітом. Наприклад, сенсор кисню являє собою гальванічний елемент з двома електродами і є джерелом струму, величина якого пропорційна концентрації кисню.



Рис. 1.1. Електрохімічний датчик чадного газу «ME4-CO» для промислового використання

Однак, такі датчики досить сильно піддаються корозії чи хімічним забрудненням. Їх термін використання складає 1-2 роки, перш ніж вони потребуватимуть заміни. Електрохімічні детектори газу використовуються на нафтопереробних заводах, газових турбінах, хімічних підприємствах, підземних сховищах газу тощо.

Каталітичні (термохімічні) датчики.

Термохімічні датчики, базуються на вимірі теплового ефекту реакції каталітичного окислення газу, їх застосовують для визначення концентрацій горючих газів. Вони складаються з мініатюрного чутливого елемента, що іноді також називається «кулькою», «пеллістором» (Pellistor) або «сігістором» (Siegistor). Останні два є зареєстрованими торговими марками серійних пристроїв. Вони виготовлені з електропідігрівомої котушки з платинового дроту, на котру спочатку нанесена керамічна підкладка, наприклад, оксид алюмінію, а потім криюча зовнішня оболонка з палладієвого або родієвого каталізатора, розпорошеного на підкладку з окису торію.



Рис. 1.2. Каталітичний датчик MSA 94150

Принцип дії цього типу датчиків заснована на тому, що, при проходженні газо-повітряної суміші, на поверхні каталізатора виникає горіння і тепло, що виділяється, підвищує температуру кульки. Викликане цим збільшення опору платинової котушки реєструється мостовою схемою, друге плече якої не має оболонки - каталізатора. При малих концентраціях зміна опору знаходиться в прямій залежності від концентрації газу в навколишньому середовищі. Типова напруга на датчику – кілька вольт, струм 0,1-0,3 ампера. Значення T90 (час попереднього нагріву) для каталітичних датчиків зазвичай становить 20 - 30 секунд [143].

Напівпровідникові датчики

Напівпровідникові датчики виявляють гази за хімічною реакцією, яка відбувається, коли газ безпосередньо контактує з датчиком. Двоокис олова - найпоширеніший матеріал, що використовується в напівпровідникових датчиках. Електричний опір датчика зменшується, коли він контактує з контрольованим газом. Опір діоксиду олова, як правило, складає близько 50 кОм у повітрі, але може знижуватися до 3,5 кОм у присутності 1% метану. Ця зміна опору використовується для розрахунку концентрації газу.



Рис. 1.3. Напівпровідниковий датчик чадного газу TGS2442

Напівпровідникові датчики зазвичай використовуються для виявлення водню, кисню, метану, парів спирту та шкідливих газів, таких як: окис вуглецю. Оскільки датчик повинен контактувати з газом, щоб виявити його, напівпровідникові датчики працюють на меншій відстані, ніж інфрачервоні або ультразвукові детектори [143].

Інфрачервоні датчики

Інфрачервоні датчики використовують випромінювання, що проходить через відомий об'єм газу; енергія з пучка датчика поглинається на певних довжинах хвиль залежно від властивостей конкретного газу. Наприклад, окис вуглецю поглинає довжини хвилі приблизно 4,2-4,5 мкм. Енергія у цій довжині хвилі порівнюється з довжиною хвилі за межами діапазону поглинання; різниця в енергії між цими двома довжинами хвиль пропорційна концентрації присутнього газу.



Рис. 1.4. Інфрачервоний датчик газу Searchpoint Optima Plus

Даний тип датчика є вигідним, тому що його не потрібно поміщати в газ для його виявлення. Може використовуватися для дистанційного зондування. Інфрачервоні датчики можуть використовуватися для виявлення вуглеводнів та інших інфрачервоних активних газів, таких як водяна пара та діоксид вуглецю. ІЧ-датчики зазвичай зустрічаються в установках очищення стічних вод, нафтопереробних заводах, газотурбінних установках, хімічних заводах та інших об'єктах, де присутні легкозаймісті гази, де існує можливість вибуху. Можливість дистанційного зондування дозволяє контролювати великі обсяги простору [143].

1.3. Безпілотні літальні апарати як платформа для досліджень якості повітря

Можливості літаків у контексті моніторингу якості повітря є критичним аспектом, який необхідно враховувати, виходячи з мети дослідження. Літак може зазвичай охопити більшу площу протягом певного проміжку часу та забезпечити гнучкість у термінах монтажу датчиків. Однак, оскільки вони не можуть висіти на одному місці і мають мінімальні вимоги до робочої висоти, їх висока просторова різноманітність може бути досягнута за рахунок зменшення просторової роздільної здатності. У деяких випадках вони можуть бути по суті стабільними, дозволяючи певні нехтування при виникненні несправностей, такими, що можливо, збереження бортового обладнання. Їм також необхідна коротка злітно-посадкова смуга (30-200 м) або використання пускового пристрою [53-56]. Вони можуть мати компактні розміри для легкого транспортування та розгортання, що дозволяє працювати в віддалених місцях [57].

Вертольоти та мультикоптери (квадрокоптери, гексакоптери або октакоптери), як правило, мають меншу швидкість руху ніж літаки, але є більш маневреними та дозволяють переривчасті траєкторії та висіння. Зазвичай, збільшення просторової роздільної здатності досягається за рахунок зменшення просторової різноманітності. Останні досягнення у контролі зробили ці нестабільні платформи більш надійними та простішими в роботі, зменшуючи ризик пошкодження вантажів та аварій в цілому. Вони не потребують спеціалізованого обладнання або злітно-посадкової смуги для запуску та посадки, і в залежності від їх розміру є легшими у транспортуванні. Розміщення датчиків повинно бути добре спроектовано для апарата такого типу. Датчик, як правило, розташований далеко від пропелера.

Інші типи літальних апаратів, такі як: парасейли та аеростати (повітряні кулі), також можуть бути використані [58]. Вони можуть нести більше корисне навантаження, але є повільнішими в порівнянні з літаками. Вони також можуть працювати тривалий час, але в деяких випадках можуть бути важко контрольованими і менш маневреними [59]. Це пояснюється головним чином

їх високою сприйнятливістю до погодних умов навколишнього середовища [60].

Безпілотні літальні апарати також можуть використовуватися в автономних операціях з використанням єдиної платформи або більш продвинутих систем, що використовують декілька літальних апаратів. У кожному випадку наземна станція, як правило, потрібна для віддаленого керування та координації місії.

Група БПЛА може літати роєм, може бути скоординованою для незалежних польотів із взаємодоповнюючими траєкторіями в межах однієї програми [61]. Для цього потрібні розширені централізовані або децентралізовані алгоритми контролю та керування. Вони мають потенціал для підвищення якості та кількості даних, зібраних з меншим навантаженням оператора. В даний час застосування безпілотних систем було продемонстровано для широкого кола пов'язаних пристроїв [62].

Безпілотні літальні апарати також можуть розглядатися як корисні інструменти для контролю та управління моніторингом факелу забруднення в рамках системи моніторингу лих [63,64]. Вони мають потенціал для забезпечення вибірки просторових та часових даних з високою роздільною здатністю на великих територіях або в конкретних місцях. БПЛА також можуть бути використані на місцевому, районному або польовому рівнях залежно від типу даних, що збирається, та характеристик платформи. Ці набори даних можуть потім бути пов'язані безпосередньо з іншими вимірами залежно від кількості допоміжних датчиків та використаних літальних апаратів/агентів. Вартість одиниці, включаючи платформу та допоміжне обладнання, таку як наземна станція, може бути значною. Але, в залежності від обставин, подальша експлуатація може бути менш дорогою, ніж експлуатація пілотованих літальних апаратів або супутників.

БПЛА були використані дослідниками та комерційними організаціями для вимірювання атмосферних газів та аерозолів [65], і було показано, що вони здатні входити у віддалені зони та обстежувати великі території [66,67].

Наступні підрозділи висвітлюють внесок БПЛА в область досліджень якості повітря.

1.3.1. Вивчення атмосферного складу і забрудненості повітря та зміни клімату

Застосування БПЛА для вимірювання атмосферного складу, забруднення та зміни клімату включає в себе тестування зразків на місці вище, нижче та в межах атмосферного шару, як це було повідомлено в ряді досліджень, переглянутих нижче.

1.3.2. Вимірювання вектору вітру

Для вимірювання вектора вітру БПЛА може виконувати спіральну траєкторію польоту. Горизонтальний вітер можна виміряти, використавши трубку Піто, встановлену на носі безпілотної. Однак, при цьому відсутні кути потоку повітря, тому вектор вітру можна обчислити лише шляхом виконання спеціальних маневрів, що дає горизонтальну роздільну здатність близько 300 метрів [68].

Метеорологічний міні БПЛА "M²AV", розроблений Спієсс та іншими, (злітна маса 5 кг, вантажопідйомність 1 кг, дальність польоту більше 50 км), здатний вимірювати дані T (температура), H (вологість) та вектор вітру [69,70]. Дані, зібрані БПЛА (температура), виявилися добре узгодженими. Максимальна різниця була меншою за 0,5 К [68]. Ван ден Кроненберг та інші [103] використовували той самий БПЛА M²AV для розробки бортової системи по збиранню вітрових даних. Система складалась з п'ятиходового зонду, GPS приймача та інерціальної навігаційної системи (ІНС), що означає, що інерційний піддіапазон локально-ізотропної турбулентності може вимірюватися до 40 Гц (або 0,55 м при 22 м·с⁻¹ швидкості руху повітря). Під час слабкого вітру (3-4 м·с⁻¹) дані з БПЛА узгоджуються з акустичним радаром (Содар) та метеорологічними даними в межах 1 м·с⁻¹.

Проте, вимірювання на БПЛА супроводжувались великими середньоквадратичними відхиленнями до 0,4 м·с⁻¹ при вимірюванні сильного вітру (6-7 м·с⁻¹). M²AV вимірював високі середні швидкості вітру порівняно з

сусідніми профілями Содар, але добре узгоджувався з вимірами метеорологічної станції.

Результати роботи Ван ден Кроненберга та інших [71] наводять на думку, що для точного вимірювання вектора вітру, будь-якому БПЛА потрібно мати п'ятиходовий зонд, GPS-приймач та ІНС.

Мартін та інші [72] використовували "M²AV" БПЛА в ході кампанії над Лінденбергом (Німеччина) для вимірювання ранкових та вечірніх атмосферних граничних рівнів. При швидкості підйому 3 м/с та оснащені датчиками з високою швидкодією (частота відклику 30 Гц). Цей дрон зміг забезпечити вертикальну роздільну здатність 10 см для температури, вологості, напрямку та швидкості вітру. Зібрані дані були добре узгодженими з наземними вимірюваннями.

Ще один БПЛА літав в Ісландії протягом кількох кампаній для вимірювання температури, вологості, швидкості та напрямку вітру до 3500 м над рівнем землі [61,73]. Він успішно працював у полярних умовах, досягаючи 1500 м по висоті, при температурі -20°C та швидкості вітру 15 м/с. Результати цих вимірювань були використані для порівняння та оцінки результатів моделі Продвинутого дослідження та прогнозування погоди. Дані спостереження та моделі добре узгоджені, проте в деяких випадках модель не відтворювала малих інверсій, виміряних БПЛА, які повідомляли про два шари на висоті 200-500 м і 1000-1300 м, які були сухішими, ніж очікувалося. Фактично, модель завищувала вологість приблизно на 25%. Збір даних про вітер був можливий тільки під час автономного польоту. З міркувань безпеки цей політ може бути активований лише вище 200 м, і, отже, не було отримано даних про вітер нижче цього порогу. Іншим обмеженням була необхідність роботи в умовах безхмарного неба або в умовах тонкої хмарності, оскільки система стабілізації БПЛА, яка базується на інфрачервоних датчиках, потребує різниці температур випромінювання приблизно 8 К між землею та небом [73]. Реудер та інші [61] працювали над оптимізацією системи БПЛА, до якої входили: новий автопілот для посилення літаючої здатності в хмарному режимі, більш швидкодіючий

датчик температури для зменшення часу вимірювання від 5 до 1 с та адаптація п'ятиклапанного зонда. Використання цього самого зонда, з таким самим підходом, було запропоновано і Ван ден Кроненбергом та іншими [71], що дозволило БПЛА визначити 3Д вектор турбулентного потоку з тимчасовою роздільною здатністю 100 Гц.

Робота Реудера та інших [61] показала: (1) що можна було інтегрувати датчики на борт БПЛА для вимірювань якості повітря (оптимізовано в межах 650 льотних місій з моменту першої спроби у 2009 році [74]); але також (2) дані температури, вологості та вітру, зібрані під час польової кампанії, були важливими для вивчення випадків анабатичного потоку з низин до підніжжя Піренеїв.

1.3.3. Збір даних про атмосферні аерозолі

Універсальність безпілотних літальних апаратів була показана в декількох місіях, спрямованих на дослідження атмосферних аерозольних властивостей, зокрема світло-адсорбційних та світлорозсіювальних властивостей. Використання системи на основі трьох БПЛА було успішно виконано під час проведення Мальдівської Кампанії (2006 р.) для одночасного вимірювання параметрів аерозольного хмарного випромінювання в межах однієї атмосферної колони [67]. Мета полягала у з'ясуванні характеру розбіжностей між моделями та спостереженими даними в умовах чистого неба. Дрони літали з горизонтальним поділом 10 м і затримкою менше 10 с, щоб уникнути неоднозначностей, що виникають в результаті просторової та тимчасової мінливості аерозолів при проходженні тієї ж географічної точки (або хмар). Результати показали, що модель була в межах експериментальної похибки 15% порівняно з даними, зібраними під час польоту між 500 м до 3000 м. Рамана та інші [66] і Рамантан та інші [67,75,76] зазначили, що немає необхідності викликати аномальне або надмірне поглинання або невідому фізику в ясному небі.

Робота Рамантана та інших [76] показує корисну інформацію щодо інтеграції датчиків, проектування польоту та реального польоту рою БПЛА.

Крім того, робота є значною з точки зору зібраних даних, подолання проблеми прямого вимірювання сонячної теплової енергії, спричиненого чорним вуглецем. Це стало можливим завдяки використанню трьох БПЛА, що пролетіли фіксованим формуванням в одному і тому ж середовищі на різних висотах для вимірювання розбіжностей потоку (швидкості нагріву) протягом тривалого часу. Дослідження також показало, що атмосферні коричневі хмари з видимою оптичною глибиною поглинання до 0,02 є достатніми для посилення сонячного нагріву нижчої атмосфери на 50%. Корріган та інші [25] використали два однакових літаки в формуванні типу стек для контролю загальної концентрації маси та розподілу розміру частинок, поглинання аерозолі та концентрації чорного вуглецю в змішаному шарі над Індійським океаном. Кожна платформа важила всього 27 кг та мала 5 кг корисної завантаженості. Крейсерська швидкість 60 вузлів (111 км/год) дозволяла БПЛА літати протягом 5 годин, забезпечуючи номінальний діапазон 550 км. Різниця між даними, зібраними повітряними та наземними приладами, а також літаком до літака становила менше 10%. Проте, проведені вимірювання оптичної глибини аерозолів за допомогою БПЛА, відрізнялися на 20% більше, ніж ті, які були взяті стовпчиковим сонячним фотометром AERONET. У цьому випадку дані, зібрані БПЛА дозволили Корріган та іншим [25] спостерігати великий аерозольний шлейф над змішаним шаром, при піковій концентрації біля 2000 м. Цей результат узгоджується з попередніми дослідженнями, які спростували загальне припущення про те, що змішаний шар має рівномірну концентрацію компонентів, які експоненціально знижуються над цим шаром.

Дослідження Бейтса та інших. [77], метою якого було створення вертикального профілю атмосферних концентрацій чорного вуглецю із застосуванням БПЛА в ході 18 польотів (38 льотних годин). Бортове обладнання було налаштовано на концентрацію частинок у повітрі та врахування абсорбції аерозольних покриттів (на трьох довжинах хвиль), а також на збір частинок за допомогою 8 фільтрового сприймача (для офлайнного аналізу). Згідно з планом польоту БПЛА повинен був піднятися

до 2700 м, спуститися до висоти максимальної концентрації аерозолю, а потім проводити відбір проб на цій висоті. Концентрація чорного вуглецю коливалася як нижче межі виявлення ($0,04 \text{ мкг/м}^{-3}$), так і до $0,51 \text{ мкг/м}^{-3}$. Використовуючи БПЛА, Бейтс та інші [77] змогли виміряти переміщення та розподіл чорного вуглецю вище атмосферного граничного шару, яке раніше було зроблено пілотованими літаками, що неможливо виміряти з наземної станції.

Альтштедтер та інші [78] розробили систему застосування легких літаків для виявлення аерозоля на місці (ALADINA) для вивчення тривимірного розподілу ультратонких частинок в межах атмосферного граничного рівня. БПЛА, оснащений двома лічильниками конденсаційних частинок та оптичним приладом для часток, з загальною корисною масою 2.8 кг, вдалося виміряти розподіл аерозолів на висоті до 1000 м від землі. Автори повідомляють, що концентрації, виміряні БПЛА, були сумісними з тими, які були отримані за допомогою спектрометра та аеродинамічним сепаратором частинок на рівні землі, проте відсоток узгодження між наземними та повітряними вимірами був не представлений. Робота Альтштедтера та інших [78] продемонструвала можливість інтеграції двох лічильників конденсації часток на борту БПЛА для вимірювання ультратонких частинок. Однак, прилади виміряли кількість часток у діапазоні 11 нм та 2 мкм, а не тільки з фракцією ($<100 \text{ нм}$), як зазначено в заголовку роботи. Дослідження фокусувались та надали детальну інформацію, щодо інтеграції датчиків, а не перевірку даних, зібраних системою БПЛА.

Харрісон та співавтори [79] запропонували використовувати дистанційне керування літаком для дослідження горизонтальної, вертикальної та часової мінливості твердих часток в межах перших 150 м атмосфери. Вони мали на меті довести, що системи на базі БПЛА можуть бути методологією перевірки наступного покоління для супутників. Харрісон та інші [79] використовували модифікований 3-х метровий літальний апарат (успішно використаний у іншому дослідженні [80]) для виконання чотирьох різних польотів: перші три

були по овальній траєкторії з підвищенням висоти після кожної петлі, починаючи з 30 м і, нарешті, досягаючи 140 м. Обладнання на БПЛА складалось з аерозольного спектрометру з впускним зондом, встановленим спереду, щоб дозволити збір зразків з незбуреного повітря (специфікації корисного навантаження не вказані). Середня концентрація твердих частинок для трьох польотів з різною висотою становила $36,3 \text{ мкг/м}^3$, а найбільша концентрація була зареєстрована нижче 10 м. Результати показали загальну вертикальну варіацію зі стандартним відхиленням всього лише $3,6 \text{ мкг/м}^3$. Концентрація твердих частинок суттєво не змінилася протягом дня, середні концентрації для перших трьох рейсів становили 35,1, 37,2 і $36,8 \text{ мкг/м}^3$. Меншу концентрацію $23,5 \text{ мкг/м}^3$ було зареєстровано під час постійного висотного польоту. Харрісон та інші [79] вважають, що це зменшення концентрації є значним, порівняно з варіаціями концентрації в будь-якому з перших трьох польотів. Отже, постійна висота не призводить до змін. Тут для пояснення причини зміни необхідні додаткові дані.

Політ на майже постійній висоті 60 м було проведено для характеристики варіації в масштабі субпікселів супутникових даних; дані були розділені на 120×65 метровій сітці. Середня концентрація твердих частинок у клітинах сітки була в межах стандартного відхилення будь-якої комірки сітки, з коливанням від 20,5 до $24,9 \text{ мкг/м}^3$. Це означало, що концентрацію твердих частинок можна точно визначити як масив пікселів даних, еквівалентний області польоту.

Інші дослідники використовували мульти-роторні БПЛА для подолання обмежень наземної станції при вимірюванні поверхневих градієнтів газів і концентрації твердих частинок. Брейді та інші [81] використав квадрокоптерну систему для вивчення вертикальної та горизонтальної концентрації CO_2 і твердих частинок при високій просторовій роздільній здатності (1 м) в атмосферному змішаному шарі (0-100 м). Була використана платформа 3D Robotics Iris+ і система була створена шляхом інтеграції двох комерційних датчиків на борт БПЛА: (1) двоканальний оптичний датчик (MetOne 80080)

для вимірювання твердих частинок з діаметром атмосфери від 0,5 до 1 мкм (перший канал) та більше 1 мкм (канал 2); (2) датчик CO₂ NDIR (CO₂Meter-30) для виявлення CO₂ між 0 і 10³ часток на мільйон. Вантажопідйомність складала 510 г, що обмежувало час польоту до 5 хв, проте цього було достатньо для спостереження за утворенням морських аерозолів в зоні прибою (високоінтенсивна виробнича зона для морських аерозолів через велике розбиття хвиль), що показує високу точність у вертикальних ($\pm 0,5$ м) і горизонтальних положеннях (± 1 м). Система БПЛА літала горизонтально на відстані 5, 10, 15 і 25 м від пляжу до зони спостереження, щоб характеризувати аерозольний покрив, забезпечуючи як вертикальні, так і горизонтальні профілі. Профіль, отриманий із загальної кількості 13 вертикальних замірів, показав максимальну висоту аерозольного покриву 40 м над зоною спостереження, а також кружляння концентрації частинок 0,5-1 мкм на висоті 70 м. Ці горизонтальні та вертикальні аерозольні профілі дозволили дослідникам розрахувати швидкості викидів вологості навколишнього середовища для малих і великих частинок у зоні спостереження. Метою майбутніх робіт є створення легшої системи, для збільшення тривалості польоту. Загалом, система БПЛА забезпечила ефективну платформу для відбору проб для вимірювання вертикальних та горизонтального профілів аерозолів морських бризг, сформованих в межах атмосферного граничного шару.

Мьолдерс та інші [82] теоретично вивчили спроможність БПЛА забезпечити просторовий розподіл середніх концентрацій забруднення, використовуючи дані про пожежу у гірському комплексі на Алясці в 2009 році. Оцінювана модель дослідження погоди та прогнозування відповідно до хімічних даних (WRF/Chem) була використана для позначення умов атмосферного граничного рівня. Віртуальний БПЛА, здатний летіти 20 годин (з нульовим навантаженням), пролетів на різних висотах, швидкостях та по різних траєкторіях для зібраних даних з WRF/Chem. Вимірювання CO на БПЛА відповідає наземним вимірюванням в межах фактора два на висоті 1000 м, що свідчить про те, що система БПЛА може забезпечити хороші

середньодобові розподіли CO на 1000 м для території 60 км 60 км. Проте, необхідно враховувати окремі середні розподіли для денного та нічного часу при розгляді забруднюючих речовин, що беруть участь у ланцюгах фотохімічних реакцій (SO₂, NO). Фактично, результати показали, що добовий цикл концентрації SO₂ та NO призвів до переоцінки в порівнянні з наземними вимірами. Крім того, через відносно короткий період темряви на високих широтах наприкінці літа, для зйомок даних вночі потрібен рій БПЛА. Кожен дрон буде слідувати своїй схемі польоту протягом 20 годин.

Авіаційне сповіщення отримало б вигоду від можливості БПЛА збирати дані навколо верхньої частини атмосферного граничного шару, що дасть інформацію про розсіювання факелу забруднення в атмосфері. Це особливо важливо, коли супутникові знімки не можуть надати таку інформацію через хмарне покриття в середній та верхній тропосфері.

Стратегії вибірки для збору даних про метеорологічні та хімічні величини різні. Прогнози якості повітря та віртуальна методика вибірки можуть допомогти у ефективному, оптимізованому плануванні польотів та збиранні даних. Проте, автори припустили нульове корисне навантаження, в той час, як навіть найлегші бортові датчики додадуть певну вагу до БПЛА. Чим важче корисне навантаження, тим менше палива можна додати, що зменшує тривалість польоту.

Розгортання БПЛА для повідомлень про якість повітря потребує тривалого польоту для охоплення великих територій, таких як пожежі при особливо сильному вітрі. Мьолдерс та інші [82] стверджував, що легкі і досить маленькі прилади для системи на базі БПЛА, що здатні працювати з високою частотою все ще потребують розробки.

1.3.4. Вимірювання парникових газів та інших газоподібних забруднювачів

Берман та Фладельнд використовували БПЛА SIERRA, оснащений індивідуальним аналізатором парникових газів, для проведення високоточних (1 Гц) вимірювань концентрацій CO₂, CH₄ та водяної пари на низьких висотах

(≥ 10 м) у Свальбарді, Норвегія [83, 84]. Результати з SIERRA узгоджуються з тими, що вимірюються станцією Цепелін на висоті 475 м над рівнем моря (відсоток узгодження між показаннями на різних станціях не повідомлявся).

Малавер та інші [85-88] дослідили можливість польоту БПЛА на сонячних батареях в рамках бездротової мережі датчиків на сонячній енергії, для постійного моніторингу парникових газів, використовуючи сонячну енергію для вирішення проблеми енергоспоживання.

Росії та інші [89, 90] працювали над питанням енергоспоживання БПЛА та датчиків і успішно розробили нову систему для вимірювання летких органічних сполук та газів. Пристрій заснований на повністю автоматизованому металооксидному датчику, здатному працювати та зберігати дані протягом 30 хв. Дослідники встановили пристрій під гексакоптер і виконали два експерименти. Перший - висіння над ємністю з розчинником (ізопропіловий спирт), а другий - політ над університетським димарем їдальні і показав, що повітря не впливає на вимірювання та здатність системи проаналізувати просторову концентрацію летких органічних сполук.

Обидва дослідження Малавера та інших [85-87] і Росії та інших [89, 90] були зосереджені на інтеграції датчиків та показали можливість інтеграції низькочастотних датчиків з низьким енергоспоживанням, щоб дозволити більш тривалий час вибірки, а не для кількісного вимірювання цільових газів.

Ватаї та іншими [65] було продемонстровано, що безпілотники є придатним та економічно вигідним методом для вимірювання просторових та тимчасових варіацій атмосферного CO_2 в і вище атмосферного граничного рівня. Дослідники інтегрували, відкалібрували та випробували 3,5 кг CO_2 чутливий модуль з 20 секундним часом відгуку та точністю 0,26 ppm (часток на мільйон). Максимальний час польоту 1,5 години. БПЛА зміг піднятися на 2000 м (основна площа спостереження), а потім спуститися по спіралі до приблизно 650 м, перш, ніж повернутися та приземлитися в початковій точці. Після 15 польотних випробувань Ватаї та інші [65] зазначили, що система була здатна проводити точні вимірювання високочастотного випромінювання для

визначення тимчасової тенденції зміни CO₂, яка мала тенденцію до зміни між шарами від 200 до 400 м і 400-600 м. Проте, дані, щодо CO₂, не були зібрані на наземних станціях, і тому прямі порівняння були неможливі.

Іллінгворт та інші [91] підтвердили як ефективність витрат безпілотних літальних апаратів, так і обмеження наземних інструментів для моніторингу мінливості цільових газів на локалізованій території, а також надання важливої інформації щодо швидкої характеристики мікрометеорології та хімічного складу. Іллінгворт та інші [91] встановили на борт недорогого безпілотника (Skywalker Technology, Ухань, Китай) озонозонд (вироблений Science Pump Corporation, Camden, NJ, USA) для вимірювання коливань концентрації озону в міських масштабах. Польоти біля Манчестеру, Велика Британія, зафіксували пікову концентрацію приблизно 39 ppm, що було пов'язано з короткочасною зміною напрямку вітру. З іншого боку, дані, зібрані двома сусідніми наземними станціями, не свідчили про таку дисперсію, а, скоріше, про постійну концентрацію O₃ приблизно 19 ppm і 26 ppm відповідно.

Лоуренс та інші [92] розробив недорого (корпус літального апарату 400 доларів США, датчики 300 доларів США) безпілотну систему для вирішення потреб в тонкомасштабних вимірюваннях атмосферних змінних по всій тропосфері та нижній стратосфері. Система БПЛА DataHawk (0,7 кг, 1,0 м розмах крил) здатна вимірювати температуру навколишнього середовища, вологість, вектор вітру та турбулентність з високою просторовою роздільною здатністю (1 м над горизонтальною шкалою в 1 км), а на висотах від декількох метрів не менше 9 км. Робота показала не тільки можливість інтеграції недорогих датчиків з достатньою точністю даних (температура, вологість та точність швидкості вітру: 2°C, 2%, 0,2 м·с⁻¹), а також можливість збирання даних аж до верхніх частин атмосферного граничного рівня.

В цілому, БПЛА можуть робити значний внесок з точки зору збору атмосферних даних в рамках атмосферного граничного рівня, а також у більш складних середовищах, таких як гірські райони [73]. Знання стосовно аерозольних вертикальних профілів у атмосферній колоні також можуть бути

вдосконалені при використанні безпілотних літальних апаратів, особливо там, де доступна обмежена інфраструктура, така як у віддалених або ворожих районах. Крім того, одержання профілів нижчої атмосфери, що досягає приблизно 3 км над поверхнею землі, кожні 30 хв забезпечує достатню часову роздільну здатність для вивчення відповідних хіміко-фізичних процесів в атмосфері. Системи БПЛА можуть перевіряти супутникові дані та вимірювати горизонтальну, вертикальну та тимчасову варіації газоподібних і аерозольних забруднювачів в нижчій атмосфері, однак передбачувані застосунки таких систем повинні відповідати їх дизайну. Ці проектні фактори включають в себе тип необхідного моніторингу (місцевий, регіональний та ін.), цільова активність, необхідна (відбір зразків летючі органічні сполуки, гази або збір даних) робоча частота, безпека, вартість та довгострокова гнучкість для цієї програми, а отже, можливості та обмеження платформи БПЛА.

Незважаючи на переваги вартості та гнучкості, малі БПЛА залишаються обмеженими завдяки їхній корозійній витривалості, низькій пропускну здатності та інтеграції з мережею. Технологія сенсорів є іншим обмеженням для використання легких БПЛА, коли необхідна швидка вибірка проб (1 сек) і висока роздільна здатність (ppb – часток на мільярд). Для дослідників надзвичайно важливо вибрати або спроектувати нову систему БПЛА для забезпечення якості повітря, беручи до уваги, як перевірити вимірювання, враховуючи, що використовувані в них датчики, можливо, не були розроблені для монтажу на борту безпілотника. Використання малих БПЛА з масою до 7 кг сприяє максимальній їх продуктивності. Використовуючи такий клас дронів, збільшується тривалість одиничного польоту та щоденна вибірка. Питання полягає в тому, що більшість комерційно доступних, систем БПЛА не призначені для полегшення цих операцій. Час налагодження та розбирання є надмірним, а окремі компоненти не призначені для інтенсивного використання [68].

Ці обмеження потрібно подолати разом з поточними обмеженнями авіаційних польотів, щоб полегшити широке використання дронів для оцінки якості повітря.

БПЛА можуть також використовуватися для регулярного патрулювання навколо промислових районів [93] та ділянок з металевими рудами. Такі вимірювання якості повітря розширюють діапазон моніторингу за межі постійних локацій для збирання/передачі даних, що допомагають для швидшого прийняття рішень [94]. Дрони можуть також використовуватися як інструмент попередження та ранньої діагностики екологічних катастроф, таких як контроль рівня ядерного випромінювання для виявлення витоків випромінювання [95,96].

Альвараво та інші [97] розробили два невеликих БПЛА - літак і багатороторний апарат, як частину системи для збору даних після вибухових робіт на відкритих шахтах. Дрон Teklite (комерційно доступний) був вибраний завдяки своїй портативності, легкості інтеграції датчиків, успішність льотних випробувань, малої ваги та низької (<100 футів) цільової висоти польоту. Розблений квадрокоптер вагою 2,5 кг (включаючи батареї), був використаний для запису даних на 35 м нижче рівня землі. Корисна вимірювальна вага складалась з сенсора SHARP GP2Y10 для моніторингу твердих частинок, який був відкалібрований у лабораторії та продемонстрував високу кореляцію (коефіцієнт кореляції R2 більше 0,9) за допомогою промислового пристрою для моніторингу пилу. Талькову пудру використали, як джерело твердих частинок для перевірки системи, при цьому результати показують, що система здатна збирати значний об'єм даних. Альвараво та інші [97] зазначили, що окремі рівняння калібрування потрібні, якщо корисне навантаження має різні датчики, і що необхідний інший оптичний датчик для вимірювання концентрації з точністю вище ніж 1 мг/м³.

Дослідження Альвараво та інших [97] показали, що інтеграція датчика якості повітря та автопілота на борту безпілотної системи є можливою. Система БПЛА може допомогти охарактеризувати частинки, що містяться в повітрі, у

часі та в просторі, однак така система повинна бути перевірена перед реальним застосуванням. Нарешті, аналіз зібраних даних необхідний для подання програмного забезпечення для моделювання атмосфери та для алгоритмів планування траєкторії польотів. Полланен та інші [98] випробували новий модуль для БПЛА з вагою менше 0,5 кг, використовуючи невеликий гамма-спектрометр для виявлення радіоактивних радіонуклідів, що випромінюють альфа-частинки, у повітрі на рівні $0,3 \text{ Бк/м}^3$, припускаючи, що 0,5 години відбору проб і 1 год підрахунку часу. Полланен та інші [98] використовували низькоактивне джерело ^{137}Cs (зазвичай використовується для калібрування енергії детектора) і автономно пілотував БПЛА на неекранованих джерелах декілька разів протягом часу приблизно 50 с. Піки не відрізнялись під час польоту понад 100 м, оскільки межі виявлення незабезпеченого точкового джерела ^{137}Cs на землі становили приблизно 1 ГБк або більше залежно від висоти польоту. Значне збирання даних було можливе на 75 м, демонструючи здатність міні БПЛА для повітряного радіаційного нагляду, пошуку втрачених або викрадених незахищених точкових джерел та відображення радіоактивних опадів.

Хаусаманн та інші [64] запропонували використовувати безпілотники для моніторингу магістральних та газотранспортних трубопроводів та дослідив використання двох різних БПЛА за двома різними сценаріями: спочатку використовували невеликий легкий безпілотний літак для збору даних на низькій висоті та високій роздільній здатності; а другий використовує середньомасштабний з середньою вагою БПЛА, здатний носити важчий вантаж і з більшою витривалістю.

Хоча результати ще не опубліковані, Хаусаманн та інші [64] підкреслили необхідність повноцінної місії для визначення загальної операційної спроможності системи, включаючи платформу БПЛА, датчики, обробку даних та виявлення небезпеки. Вони також окреслили необхідність сертифікації та стандартів експлуатації для безпечної та ефективної роботи БПЛА. Робота Хаусаманна та інших [64] представила комплексний аналіз як сучасних

технологій, яка є корисною для моніторингу трубопроводів, так і вибору двох платформ БПЛА, які можуть бути використані для таких місій. Проте питання про реальний світовий потенціал, а також про інтеграцію та використання системи БПЛА для цього застосування в національному повітряному просторі, все ще потребують вирішення.

При наявності пасток з патогенними мікроорганізмами та програмування для польотів на різних місцевостях, БПЛА можуть також використовуватися для рутинних просторових та тимчасових зборів даних для полегшення раннього виявлення та запобігання розповсюдженню патогенів у повітрі [99] навіть у віддалених місцях [100-102]. Багатоканальний флюориметр для флуоресцентного виявлення частинок в повітрі в реальному часі був успішно інтегрований та експлуатований на борту БПЛА [103,104]. Аналогічно, Ролдан та інші [105] розробили міні БПЛА для контролю атмосферних параметрів під час польоту через теплиці. Використовуючи легкий квадрокоптер (рама 400 мм, центр 125 мм), Ролдан та інші [105] відобразили профілі CO₂, T, H та освітленості всередині теплиць. Одним з завдань було вирішення найбільш ефективного монтажу датчиків на борт БПЛА. З цієї причини було проведено дослідження динаміки обчислювального потоку (CFD) для підтвердження висновків двох попередніх аеродинамічних досліджень квадрокоптерів [106, 107], в яких встановлено максимальну швидкість повітря на периметрах роторів та мінімальну швидкість повітря в центрі БПЛА та поза ним, для роботи як однороторного, так і чотирьохроторного апарату. Таким чином, є лише дві можливі точки монтажу датчика: в центрі БПЛА та на відстані від нього. Для підтвердження результатів дослідження CFD, Ролдан та інші [105] прикріпили БПЛА до карданного суглоба, щоб зберегти своє точне місце розташування, і, використовуючи анемометр, вони вимірювали швидкість повітря в 24-точковій сітці над і під платформами, і знайшли результати, які відповідають моделюванню CFD. Джерело CO₂ потім помістили на землю і використовували для перевірки системи. БПЛА літали на висоті 0,5 м, починаючи від 5 м від джерела. Результати показали незначні відносні

похибки для Т (3,71%), Н (1,65%) та CO₂ (3,84%). Незважаючи на те, що результати були добре пояснені у статті, це не може сказати про точку монтування датчика (у центрі БПЛА), про висоту карданного з'єднання, про те, яке джерело CO₂ було використано, і які були зроблені висновки для врахування можливого ефекту землі. Результати реальних тестів в рамках теплиці (106 м, 47 м, висота 3 м) показали підвищення температури з першого виміру (25.3 ° C) до останнього (29.6°C) через перехід від нічної до денної температури (від 9:00 ранку до 9:22 ранку) та загальне потепління теплиці. Вологість знизилася з 43% до 33%, тоді як концентрація CO₂ показала просторову зміну, ймовірно, через різну ефективність вентиляції в деяких районах теплиці. Ролдан та інші [105] зазначив, що на відміну від вугільних агрегатів, безпілотники можуть збирати дані практично в будь-якій точці тривимірного простору теплиці, що полегшує такі дії, як місцевий клімат-контроль та моніторинг сільськогосподарських культур. Це дослідження показало можливість інтеграції дешевих і легких газових датчиків на борту невеликих БПЛА. Однак дослідження було зосереджено на інтеграції датчиків та тестуванні системи, а не на кількісній оцінці концентрацій газів. Крім того, для рутинної роботи в реальному житті може знадобитися більш тривалий час польоту (використовуваний БПЛА мав витривалість менше 12 хв.) Та не більше, ніж 100 г вантажопідйомності.

2. СТРУКТУРА ТА КОНФІГУРАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАЯВНОСТІ ШКІДЛИВИХ ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ НА ОСНОВІ МІНІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

2.1. Архітектура міні безпілотного літального апарату для моніторингу наявності газів

Базова архітектура БПЛА [108] (Рисунок 2.1) складається з: (1) рами; (2) безщіткових двигунів; (3) модулів електронного контролю швидкості (ESC, укр.: ЕКШ); (iv) контрольної плати; (v) інерціальної навігаційної системи, і (vi) модуля прийому та передачі. Безщіткові двигуни забезпечують механічну енергію, необхідну для обертання гвинтів. Обертання двигуна регулюється за допомогою ЕКШ для кожного двигуна; ЕКШ керується сигналом імпульсної модуляції (PWM, укр.: ПЗМ).

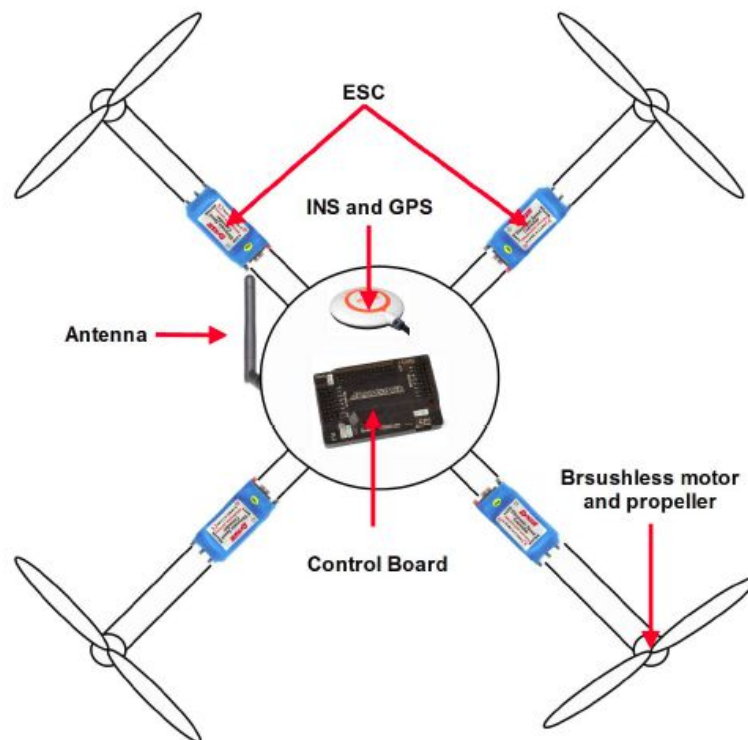


Рис. 2.1. Базова архітектура БПЛА

Змінюючи значення робочого циклу, можна збільшити і зменшити кутову швидкості гвинта. Таким чином, дрон виконує рухи по кутам нicanня, крену, тангажу та тязі, переміщується уздовж поздовжньої та горизонтальної осей. Для підвищення стабільності польоту БПЛА оснащується ІНС, яка складається з 3-х вісного акселерометра, 3-х вісного гіроскопа та 3-х вісного магнітометра для вимірювання прискорень, кутових швидкостей та магнітних значень відповідно. Отримавши вимірювання з ІНС, можна оцінити 3-х осьові вимірювання кутів Ейлера. Ці кути потім використовуються для керування орієнтацією літака під час польоту. Вимірювання орієнтації дрона ґрунтуються на основі значень прискорення та магнітного поля, які суттєво впливають на шум. З цієї причини для зменшення впливу шуму на вимірювання орієнтації використовуються алгоритми злиття даних, які враховують значення кутових швидкостей, надані гіроскопом. Прикладом алгоритмів злиття даних є розширений фільтр Калмана (ЕКФ) [109]. Ці алгоритми є обчислювально інтенсивними, тому вони можуть бути важкими для виконання на платі керування. З цієї причини інерційні вимірювальні модулі (ІВМ) з вбудованими процесорами для виконання алгоритмів злиття даних є хорошим рішенням. VN-100 SMD [110] від VectorNAV - це високопродуктивний ІВМ і Базова система орієнтації та курсу, яка включає в себе 32-розрядний мікропроцесор для обчислення вимірювань орієнтації в режимі реального часу за допомогою алгоритму ЕКФ. Ці інтелектуальні датчики були використані в [111] як вимірювальні системи для керування орієнтацією дронів.

Отже, виділимо базові елементи для розроблюваного БПЛА. Чотири основні компоненти цієї підсистеми – це рама, двигуни, електронні регулятори швидкості та акумулятор. Рама на базі DJI F450 Flamewheel. Вона виготовлена з РА6 + 30GF нейлону 6/6 армованого склопластиком, що забезпечує міцність і довговічність. Плата РСВ високої міцності була включена в дизайн апарату, щоб забезпечити централізований розподіл електроенергії. Використовувані двигуни з оцінкою 980 кВ з максимальним струмом 17,2 А під статичним навантаженням. З напругою 11,1 вольт, що постачається від акумулятора.

Двигуни здатні забезпечити 960 г тяги при максимальній швидкості обертанні двигуна. Електронні регулятори швидкості на 25А забезпечать достатню потужність та струм для двигунів, зберігаючи при цьому прийнятний буфер між фактичним поточним споживанням двигунів та максимальним струмом за допомогою ЕКШ. Джерелом живлення компонентів БПЛА є літій-полімерний (LiPo) акумулятор, що видає напругу 11,1 В.

2.2. Навігація та автопілот

Існує ряд принципів компонентів для навігації та автопілота БПЛА. Автопілот, використовуваний для програмування контролера літака БПЛА, повинен бути з відкритим кодом. Програмне забезпечення, яке використовується в автопілоті, має сумісність з Robot Operating System (ROS), що використовуються для навігації. Автопілот виступає в якості простого контролера швидкості на БПЛА. Телеметричний зв'язок використовується для передачі керуючої інформації між наземною станцією (НС) і БПЛА [112]. НС отримує передані дані і перетворює ці дані на інформацію, що піддається використанню, тобто інформацію про положення та орієнтацію. Позиційні дані потім надсилаються на ПД-регулятор, який спочатку порівнює положення та орієнтацію БПЛА з бажаною позицією та орієнтацією, після чого виконує ПД внутрішньої стабілізації, щоб підтримувати стійкість БПЛА. З цього процесу команди управління генеруються у вигляді обертальних цільових швидкостей, які б рухали БПЛА до потрібної позиції та орієнтації. Ці швидкості відправляються з НС через телеметричне з'єднання на автопілот БПЛА, який передає команди на мотори.

2.3. Бортове обладнання міні безпілотного літального апарату

У роботі [113] наведено огляд датчиків для навігації на дроні. Корисну вагу БПЛА можна розділити на дві частини: 1) глобальну навігаційну супутникову систему (ГНСС), яка дозволяє здійснювати навігацію і (2) вимірвальну систему, яка використовується для виконання завдань. Базова ГНСС складається з Глобальної системи позиціонування (GPS) та Інерціальної навігаційної системи. У роботі [114], використовуючи інерційні датчики, GPS

та відеосистему, автори пропонують техніку для оцінки положення та орієнтації БПЛА. Інформація, надана камерою, інтегрована з класичними даними, отриманими від ІНМ, за допомогою алгоритму злиття даних (лінеаризований фільтр Калмана). Цей метод можна використовувати, коли сигнал GPS недоступний, під час місій у тунелях або для внутрішньої навігації. Навігаційні системи можна класифікувати на основі середовища польоту в приміщенні та на відкритому повітрі.

2.3.1. Застосування на відкритій місцевості

БПЛА для зовнішньої навігації оснащені ІНС та GPS. Використовуючи ІНС, можна оцінити положення, швидкість та орієнтацію дрона [115]. Однак, на ці вимірювання суттєво впливають помилки зміщення, які постійно зростають з часом. Таким чином, для збільшення точності вимірювання положення використовується система GPS. Для аеронавігації, синтез GPS даних з INS за допомогою методів фільтрації є основним завданням підвищення точності локалізації, як правило, потрібне для додатків, таких як польоти із заздалегідь запланованими точковими пунктами. Найбільш використовуваним методом навігації є фільтр Калмана, який базується на лінійних моделях системи. З іншого боку, для нелінійних моделей застосовується ЕКФ. Вимірювання, надані ІНМ, а саме: прискорення та швидкості обертання, обробляються для отримання положення, швидкості та орієнтації БПЛА. Ця обробка вимагає інтеграції значень, наданих акселерометром і гіроскопом. Через інтегрування помилки прискорення та кутових швидкостей збільшують в часі дрейф при вимірюванні швидкості та положення. Для того, щоб забезпечити інформацію про місцезнаходження літака, приймач GPS виконує триангуляцію трьох сигналів, отриманих від супутників. Як правило, для компенсації помилок годинника потрібен інший супутниковий сигнал. У роботі [115] автори пропонують альтернативу методу синтезу даних на основі ЕКФ для локалізації БПЛА. Цей алгоритм злиття даних ґрунтується на даних ІНС та GPS та використовує залежні від стану рівняння Ріккаті для зменшення помилок ІНМ.

2.3.2. Застосування у приміщеннях

У [116] автори пропонують зорову систему для автономної навігації, приземлення та зарядки акумулятора. У зовнішніх середовищах GPS модуль може використовуватися для повної автономності руху БПЛА, а саме його навігації та посадки. Така система не здатна виконувати навігаційні завдання в середовищах, де не можливе використання GPS, і навігація з точковими пунктами обмежена точністю вимірювань GPS до 6 м. Алгоритм на базі зору, який використовується в [116], дозволяє оцінювати положення дрона без використання маркерів, які використовуються як контрольні точки. Цей алгоритм базується на оптичному потоці для оцінки одометрії безпілота. Набір особливостей зображення відстежується в декількох зображеннях, отриманих камерою з фіксованою швидкістю, для того, щоб оцінити рух дрона. Інша внутрішня навігаційна система запропонована в [117]. У цьому випадку БПЛА оснащений мініатюрним лазерним датчиком для одночасної локалізації та відображення, Hokuyo-URG та IHM XSens Mti-G. Знаючи початкові кути тангажу та крену, виміряні IHM, лазер вимірює в часі, набір відстаней уздовж площини x-y у власній системі відліку. Таким чином, автори оцінюють відносний рух дрона між двома послідовними скануваннями. Всі внутрішні навігаційні системи у порівнянні із зовнішніми, вимагають більшої обчислювальної здатності на борту. З цих причин процесори високої продуктивності повинні бути вбудовані в безпілоти ціною тривалості роботи акумулятора, тобто зумовлює менший час польоту в порівнянні з зовнішніми системами.

2.4. Датчики вимірювальної системи, алгоритми та схеми вимірювань

Як повідомлялося в [118], датчики дозволяють БПЛА сприймати, бачити, чути і розуміти навколишній світ. Кількість та типи датчиків, вбудованих в безпілоти, тісно пов'язані з можливостями корисного навантаження та тривалістю роботи акумулятора. Корисне навантаження на додачу до них містить систему навігації та плату керування, вимірювальну систему для виконання завдань БПЛА. За допомогою вбудовування датчиків на дрон

можна перетворити БПЛА у віддалену мобільну вимірювальну систему. В наш час кількість цивільних застосувань дронів експоненціально зростає. Серед них можна виділити: сільське господарство [119], спостереження [120], аерофотозйомка [121], виявлення витоків газу [89], моніторинг довкілля [122], археологія [123], моніторинг фотоелектричних систем [124], моніторинг будівель та споруд [125] та інспекція ліній електропередач [126].

2.4.1. Отримання даних про якість повітря

Ньюман та інші [63,127] вивчали використання газочутливого мікро БПЛА (з максимальною вантажопідйомністю 200 г, загальна злітна вага 1,3 кг та 30 хвилин польоту) для виявлення викидів на рівні землі, а також локалізації та попередження газів. Ньюман та інші [63,127] розглянули три різні алгоритми відстеження викидів: алгоритми масштабування, зигзага та псевдо градієнта. В цілому вони виконали 5600 модельних експериментів. Алгоритм масштабування був комбінацією зварювання та вітрового розряду. У цьому випадку БПЛА рухався у напрямку вітру у факел викиду і продовжував рухатись на відстань d , доки він не вийде із зони забруднення. Після цього БПЛА летів на зустріч вітру на певну відстань (d викиду), спочатку з одного боку, а потім з іншого, у повторній спробі знайти витік.

Щоб максимально збільшити шанси для потрапляння у факел витоку перед початком руху БПЛА, робот вимірював напрямок вітру, щоб оцінити, з якого боку надходить течія. Якщо робот не знайшов джерело витоку, то спроба вважалась невдалою [128]. За допомогою алгоритму zig-zag, БПЛА рухався за вітром під кутом α , крізь факел витоку і коли апарат знаходив концентрацію нижче заданого порогу, припускали, що дрон досяг краю витоку. Потім він знову вимірював напрям вітру і продовжував рухатися у напрямку вітру під кутом α по відношенню до напрямку вітру. БПЛА повторював цю процедуру, рухаючись зигзагом в межах факела витоку, зупиняючись, біля його джерела. Останній псевдоградієнтний алгоритм включав нову вимірювальну стратегію для усунення збурень, викликаних роторами БПЛА, тому що вимірювання градієнта локальної концентрації з

просторово розділеними датчиками, як частини градієнтного алгоритму, було неможливим у цьому випадку. Алгоритм псевдо градієнта також враховує інформацію про вітер, щоб обійти обмеження старих методів градієнтів підйому, які не можуть визначити, чи вони слідують у напрямку джерела витоку чи в іншу сторону від нього. Результати експериментального моделювання показали, що найбільш ефективними алгоритмами є алгоритм зигзага з $\alpha = 15^\circ$ (де α – кут, який використовується БПЛА для руху вперед), а $\alpha = 30^\circ$ так само, як і алгоритм масштабування, були найменш надійними. Вища надійність була показана алгоритмом на основі псевдо градієнта та алгоритмом зигзага з $\alpha = 60^\circ$. Наступні експерименти для визначення здатності БПЛА для спостереження за витоком у реальних умовах проводилися за допомогою пляшки CH_4 , поміщеної в кут області площею $20 \times 16 \text{ м}^2$. Для того, щоб подати газ у напрямку БПЛА, використовувався пропеллер, який був розміщений на відстані 1,5 м. Експерименти з відстеження витоку зупинялися відразу після того, як БПЛА оминав джерело, але алгоритм міг знайти джерело газу з успіхом $83\% \pm 3\%$. Збір даних за джерелом газу є також вигідним для отримання більш точної та надійної оцінки місця розташування джерела газу. Дослідження показало, що було важко знайти джерела газу в динамічному середовищі, де були присутні зміни швидкості та напрямку вітру, а також висока турбулентність.

Беннетц та інші [129] продемонстрували недоліки алгоритмів, які безпосередньо імітують поведінку комах, однак вони пропонували їх використовувати в вимірюваннях ідентифікації джерел, коли факел витоку знаходиться на більш високому рівні, наприклад, промислові димарі або де потоки повітря стабільніші.

При використанні безпілотних апаратів, розташування пробірки зі зразком та входу датчику повітря має вирішальне значення для точної вибірки [105].

Ньюман та інші [130] описали результати експериментів, спрямованих на визначення найкращого місця для прийому газового датчика на борту

квадрокоптера. Випробувано три різних підходи: активний, з використанням додаткових вентиляторів (12 В осьовий вентилятор з діаметром 24 мм, 30 мм, з повітряним потоком $5,4 \text{ м}^3/\text{год}$), з'єднаний з трубкою, що виходить за діаметр опори; напів-активний, використовуючи повітряний потік, генерований роторами; і пасивний, без будь-якого допоміжного пристрою, що направляє повітряний потік. Суттєві відмінності були виявлені між різними підходами вибірки газу, однак, жоден з них не давав змогу виміряти концентрацію еталонного газу ($0,5\%$ за об'ємом CO_2). Найвища концентрація вимірювань виявлена за активним підходом, що становило 78% від контрольної концентрації. Середня концентрація вимірювань була $0,33 \pm 0,02$ (активна)% об'ємна, що становило 66% від еталонної концентрації. Незважаючи на те, що найбільш ефективний підхід для активного транспортування газу при зменшенні ефекту розрідження пропелером, додаткова вага (76 г) карбонової трубки, розташування вхідного отвору трубки (що сильно впливає на результати вимірювань) та збільшений розмір дрона (що робить його більш чутливим до умов вітру), були виявлені як значні недоліки. Герхардт та інші [131] досліджував можливість використання зразка летючих органічних сполук на борту квадрокоптера, за винятком вбудованого насоса, і використовуючи потік, створений пропелерами, для передачі повітря в пристрій. Для видалення насоса був потрібен стабільний потік вище 150 мл/хв , і результати експерименту показали, що достатня швидкість потоку генерується при висінні БПЛА (більш ніж $80\ 000 \text{ об/хв}$, необхідний для надійного вимірювання).

Натан та інші [80] досліджували можливість використання 3 метровою літака як платформи для кількісного визначення локальних джерел викидів в атмосферу. Вимірювальний модуль складався з спеціально зробленого на основі лазерного датчику метану з точністю $0,1 \text{ ppmv}$ на 1 Гц , маса $3,1 \text{ кг}$ і споживана потужність 25 Вт . В якості БПЛА було використано AMR Payload Master 100, модифікований для двох двигунів, кожен з потужністю $7,5 \text{ кінських сил}$ та 50 см^3 в електричному еквіваленті. Датчик метану був

відкалібрований у лабораторії та порівняний з LICOR LI-7700 до та після польотів. Невизначеність бортового CH_4 відношення змішування оцінювалося $\pm 10\%$, що зазвичай недостатньо для атмосферних вимірювань, але характер місії означає, що концентрація метану вище фону значно перевищила цей рівень невизначеності. Дані було зібрано з 22 польотів навколо природної компресорної станції для моніторингу витоку CH_4 . Виміряні концентрації газу показали високу варіабельність від 0 до 73 (± 40) г CH_4 c^{-1} , від годин до днів. Щоб зрозуміти, що було причиною реальних змін у рівнях викидів, варіабельності атмосфери або льотний відбір проб, Натан та інші [80] проаналізували пари польотів, близькі за часом і з аналогічними погодними умовами. Результати висвітлили невизначеність через льотну вибірку та атмосферні умови на основі відтворюваності при $\pm 43\%$ г CH_4 c^{-1} . Під час кампанії дві додаткові та незалежні дослідницькі групи виміряли концентрацію метану на місцях. Обидва незалежні виміри є послідовними, але нижчими, ніж середня швидкість БПЛА, вимірювальна швидкість 14 (± 8) г CH_4 . Це, швидше за все, пов'язано з неможливістю вимірювання вільних викидів наземними станціями.

Статистично основною причиною помилок аналізу потоку була інтерполяція концентрації метану за вітром. Для того, щоб кількісно оцінити цю помилку, потрібна інтерполяція карти областей, де не була зроблена льотна вибірка. Дисперсія кригінгових результатів у кожній точці сітки вважалася репрезентативною від загальної невизначеності ступеня змішуваності метану, а стандартне відхилення кригінгових результатів дало відносну похибку 46%. Натан та інші [80] обрали кригінгову роздільну здатність сітки 19x19, щоб вони відповідали типовій шкалі окремих викидів (10-30 м). Результиуюча помилка внаслідок чутливості такої роздільної здатності сітки становила 4% після порівняння з двома іншими сітками 10x10 і 40x40 відповідно. Гауссово-лінійні, гаусово-косинусні, лінійні та експоненційні, порівнювалися з експоненціально-бесселевою варіограммою і не спостерігалось значної (5%) різниці. На підставі цього аналізу загальна статистична невизначеність викидів

становила $\pm 55\%$, а середня швидкість для викидів $7,4 \text{ г CH}_4 \text{ с}^{-1}$ становила $4,1 \text{ г CH}_4 \text{ с}^{-1}$, порівняно з тими, що були отримані з польових оцінок похідних ($4,2 \text{ г CH}_4 \text{ с}^{-1}$). Часовий розподіл летючої частоти викидів CH_4 від компресорних станцій потребує подальшого вивчення, але дослідження показало, що безпілотники можуть бути цінним підходом для кількісного визначення викидів із точкових джерел.

Британське агентство з навколишнього середовища нещодавно випустило звіт на підставі Аллена та інших [132], який окреслив розробку систем безпілотної техніки, обладнаних для відбору зразків парникових газів з акцентом на вимірювання викидів CH_4 на полігонах. У цій роботі гексакоптери (DJI F550) та літаки (Bormatec Explorer) успішно працювали протягом 10 днів. Аллен та інші [132] встановили, що немає високоточних ($<40 \text{ ppb}$ на 1 Гц) інструментів CH_4 , придатних для невеликих безпілотних літальних апаратів на ринку. Проте результати аналізу невизначеностей показали, що невизначеність вимірювань є дуже невеликою складовою загальної невизначеності ($\sim 3\%$ загального потоку). Тому можна припустити, що можна отримати задовільні невизначеності потоку ($<10\%$) з менш точними приладами CH_4 . Альтернативою може бути отримання CH_4 з прив'язуваного багато роторного БПЛА, який включає в себе вертикальну вибірку (профілювання) з ряду місць уздовж повітряного розрізу. В даний час доступні відповідні інструменти для роботи з ротаційною системою та лінією відбору проб (LGR-UGGA [133]). Використання переносного обладнання (наприклад, монітора CH_4 в рюкзаку є комерційно доступним) подолало б тривалість обмеження часу, необхідного для переміщення системи в різні місця. Використовуючи прив'язану платформу, розмір пристрою для виявлення метану не буде обмеженим.

Системи на основі БПЛА добре зарекомендували себе, як платформи для систем інспектування на місці, щоб проводити вимірювання ближче до джерела витоку. Однак, систематична похибка може з'явитися у ряді випадків, включаючи регіон вимірювань із значно меншим числом забруднюючих речовин та прийняттям рівномірного розподілу.

Визначення кількості викидів на БПЛА є складним завданням. Гаусова модель факелу викидів є не ідеальною для створення оцінок даних, зібраних на борту, коли існує більше одного центрального факелу викидів. Фактично всі основні гауссові факели викидів передбачають, що постійні та неперервні викиди створюють стаціонарну систему. Тому найбільшим і найбільш проблемним припущенням для наборів льотних даних буде те, що є один центральний факел викидів. Незважаючи на те, що апроксимація точкового джерела може бути доцільною для більшості відповідних досліджень, викиди з інших місць навколо досліджуваного джерела можуть суттєво вплинути на цей підхід. Для подолання цієї проблеми дослідники досліджували інші підходи, і інтерполяція Крігінга, здається, є кращою методологією для аналізу вимірювань, отриманих на БПЛА з точкового джерела [80]. Майбутні дослідження потребують оптимізації більш точної моделі, яка враховує як сегментований гауссівський факел викидів чи гауссовий вихлоп. В даний час механічні обмеження по конструкції впливають на використання БПЛА. Це пояснюється тим, що більшість комерційно доступних БПЛА не призначені для сприяння операціям, таких як кількісне визначення викидів CH_4 від компресорних станцій. Ці обмеження можуть бути вирішені за допомогою проектування, будівництва та ретельного планування польотів і вибірки безпілотних літальних апаратів [82]. Дослідження повинно бути спрямоване на ефективне планування місії/шляху та цільової перевірки для забезпечення неупередженої вибірки. Оскільки більшість операцій відбуваються на місцях з контрольованим доступом, необхідна розробка процедур, які дозволяють використовувати БПЛА по всьому периметру протягом нормальних робочих годин. Нарешті, обмеження навантаження та тривалості роботи, мережева інтеграція та аерокосмічне законодавство впливатимуть на застосування БПЛА в цій області.

2.5. Розробка функціональної та структурної схем запропонованої системи

Принцип дії запропонованої автоматизованої системи зображено у вигляді функціональної схеми на рис. 2.2.

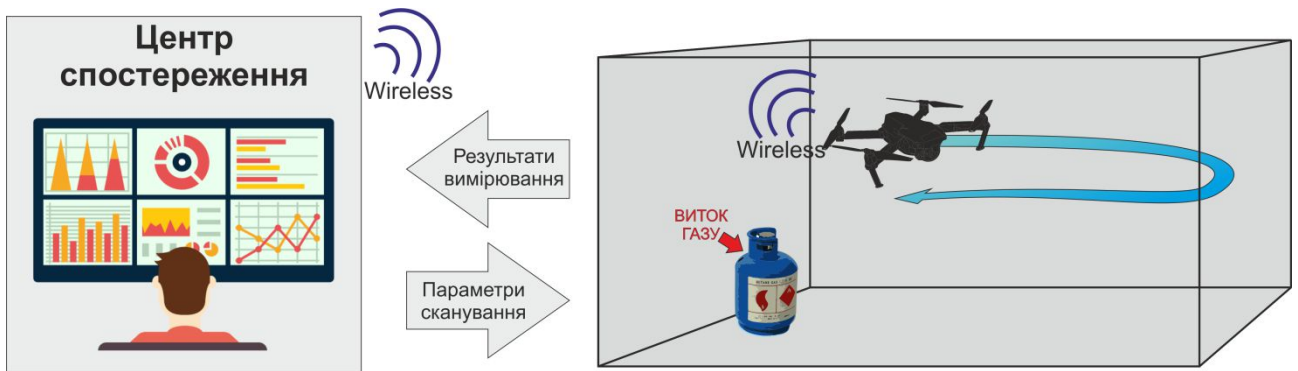


Рис 2.2. Функціональна схема автоматизованої системи пошуку газів

Із центру моніторингу та управління задаватиметься маршрут польоту, вид вимірюваних газів та їх допустима концентрація. Персонал, що знаходиться у робочій зоні, буде проінформований про небезпеку системою сигналізації, котра також, за необхідності, інформуватиме органи газової служби про виявлення надзвичайної ситуації.

На рисунку 2.3 представлена структурна схема системи, що пропонується. В блоці вимірювань, що розміщується на БПЛА, проводиться зняття показів детекторів газу, дані обробляються за допомогою плати Arduino YUN та передаються за допомогою бездротового з'єднання на комп'ютер, де проводиться аналіз інформації про газовий стан у приміщенні.

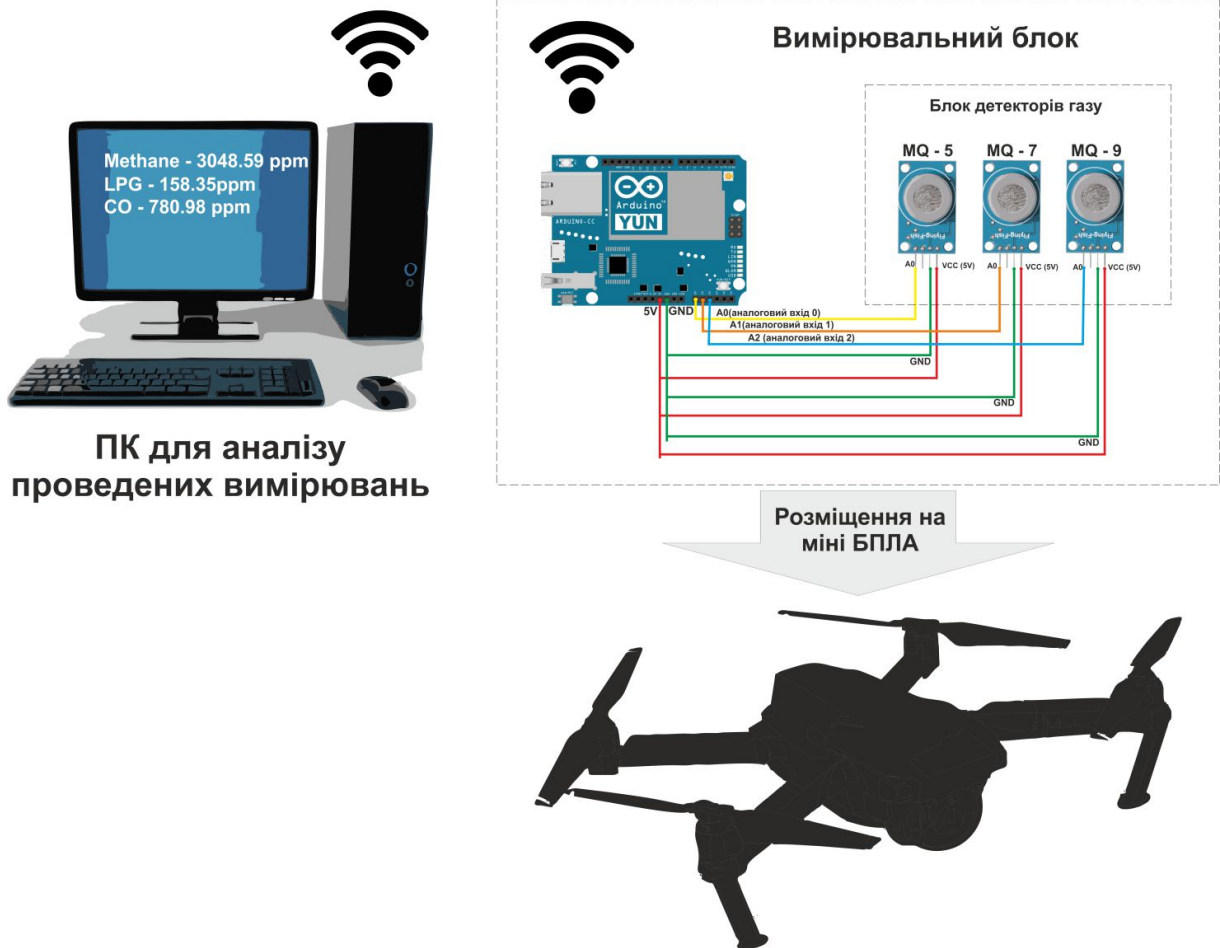


Рис 2.3. Структурна схема автоматизованої системи пошуку газів

Важливо відзначити, що безпілотні літальні апарати не можуть літати без обмежень. Відповідно до чинних нормативно-правових актів з авіаційної безпеки, обмежуються їх використання в комерційних, дослідницьких та приватних застосунках [134,135]. Наприклад, в більшості країн вимагається, щоб БПЛА керувався сертифікованим оператором. Це підвищує безпеку, але є затратним та визначає, хто може легально проводити операції на БПЛА [136]. Це, в свою чергу, безпосередньо впливає на частоту, якість та тип досліджень, пов'язаних із дослідженням атмосфери, які можуть бути проведені.

Враховуючи, що безпілотні літальні апарати – це роботи, що працюють в одному і тому ж національному повітряному просторі, як пілотовані літальні апарати. Вони також повинні дотримуватися відповідних правил безпеки авіації. Регулюючі органи авіації визначають правила та обмеження, які визначають, хто може отримати доступ до національного повітряного простору та за яких умов, з метою захисту широкої громадськості та інших

користувачів повітряного простору, забезпечуючи дотримання стандартів безпеки. Деякі правила можуть застосовуватися тільки до певного типу літальних апаратів, тоді як деякі можуть застосовуватися до всіх літальних апаратів, що працюють в певних погодних умовах, або типів польотів. У глобальному масштабі ще не визначено повний комплект правил експлуатації БПЛА [137,138].

2.6. Планування експериментів

Планування експериментів можна умовно розділити на дві групи: статичні та динамічні.

Умовно можна виділити наступні стадії підготовки статичного експерименту:

1. Моделювання;
2. Проектування;
3. Розробка програмного забезпечення;
4. Калібрування вимірювального модуля в лабораторних умовах та на відкритому повітрі;
5. Проведення експерименту.

Виходячи з аналізу досліджень, сформовано попередній план проведення динамічних вимірювань:

1. Проведення вимірювань з працюючими двигунами (апарат знаходиться на землі).

2. Проведення вимірювань з працюючими двигунами (апарат злітає на 1, 2 м вгору над землею і продовжує висіти на одному місці, після чого сідає у точку зльоту).

3. БПЛА слідує заздалегідь згенерованій траєкторії для пошуку газу.

4. Перевірка визначення напрямку вітру БПЛА.

5. БПЛА шукає газ в автоматичному режимі.

Заключною стадією для кожної групи експериментів є аналіз отриманих результатів.

3. ВИБІР ТА МОНТАЖ СКЛАДОВИХ МІНІ БПЛА

3.1. Рама квадрокоптера

В ході планування розробки міні безпілотного літального апарату, зважаючи на поставлені задачі, а також за відсутності необхідності у піднятті вантажів великої ваги, було прийняте рішення розробити класичну чотирипроменеву модель дрона.



Рис. 3.1. Рама для квадрокоптера DJI F450

В якості рами для квадрокоптера була використана досить популярна DJI F450 (рис. 3.1) - мультироторна платформа, котра за своїми характеристиками дуже схожа на всесвітньо відомий Phantom 2, але при цьому дозволяє встановлювати різноманітне додаткове обладнання.

Рама проста у збірці, сконструйована з міцного і легкого пластику. Оптимізований простір усередині рами, дозволяє розмістити будь-який сучасний контролер.

Основні характеристики:

- Модель - Flame Wheel 450 (F450)
- Вага рами - 282 грам
- Діагональна база - 450мм
- Злітна вага - 800 ~ 1600 р
- Рекомендовані пропелери - 10 × 4 "або 8 × 4.5"
- Рекомендований акумулятор - 3S ~ 4S LiPo

- Рекомендовані мотори - зі статором 22 × 12мм або 22 x 15 мм
- Рекомендовані регулятори - 15A OPTO

Вагомими перевагами даної рами є вібростійка конструкція променів, можливий друк деталей на 3D принтері, у разі необхідності ремонту, завдяки тому, що об'ємні моделі частин рами знаходяться у вільному доступі, інтегрована друкована плата розподілу живлення, оптимізована конструкція рами, що забезпечує комфортну установку електроніки і зручний доступ до неї.

3.2. Регулятори ходу

Електронний регулятор ходу (анг. ESC) – пристрій для керування оборотами електродвигуна. Електронний регулятор ходу дозволяє плавно варіювати електричну потужність, що подається на електродвигун. На відміну від простіших резистивних регуляторів ходу (зараз практично не застосовуються), які керували потужністю двигуна шляхом включення в ланцюг послідовно з мотором активного навантаження, що перетворює надлишкову потужність на тепло, електронний регулятор ходу має значно вищий ККД, та витрачає енергію акумуляторної батареї на зайвий нагрів.

Важлива функція регулятора – Fail Safe. У випадку, якщо модель втратить сигнал від передавача системи радіокерування, наприклад, при перевищенні дальності роботи або перешкод в ефірі, регулятор негайно відключає двигун.

Оскільки кожен ESC живиться від основної батареї, окремий роз'єм основної батареї повинен бути якимось розділений на чотири регулятори. Для цього використовується плата розподілу живлення. Важливо відзначити, що типи роз'ємів, що використовуються на акумуляторі, ESC і платі розподілу живлення, можуть не збігатися, і краще по можливості вибирати «стандартний» роз'єм (T-60).



Рис. 3.2. Регулятор ходу (ESC) HobbyWing Platinum Pro 30A 2S-6S Opto

Регулятор HobbyWing Platinum Pro 30A 2S-6S Opto (рис. 3.2) відрізняється високою продуктивністю вбудованого мікроконтролера, відмінною сумісністю з більшістю двигунів, точною і швидкою реакцією на зміну сигналу управління. Для виключення перешкод використовується оптична розв'язка в ланцюзі управління.

Основні характеристики:

- Номінальний вихідний струм: 30А
- Піковий вихідний струм: 40А до 10 секунд
- Напруга живлення: 2-6 елемента літієвої батареї або 5-18 елемента NiMH акумулятора
- Частота управління: 50 Гц до 432 Гц
- Управління: пропорційне з опторозв'язкою
- Максимальна частота обертання двигуна: 210000 об. / Хв для 2 полюсів BLM, 70000 об. / Хв. для 6 полюсів BLM, 35000 об. / хв. для 12 полюсів BLM. (BLM = Безщітковий Двигун)
- Розміри: 55 мм (І) * 25 мм (Ш) * 12 мм (В)
- Вага: 31 гр

3.3. Акумулятор

Батареї, які використовуються в безпілотних літальних апаратах, в даний час є майже виключно літій-полімерними (LiPo), а деякі більш екзотичні – це літій-марганцевої або інші літієві варіації. Свинцева кислота просто не підходить, і NiMh / NiCd все ще дуже важкі для своєї ємності і часто не можуть забезпечити необхідні високі швидкості розряду. LiPo пропонує

високу продуктивність при невеликій вазі і високій швидкості розряду. Напруга обраної батареї повинна відповідати обраним двигунам. Майже всі батареї, які використовуються в наші дні, що засновані на літії, містять кілька комірок на 3,7 В, де $3,7 \text{ В} = 1\text{S}$. Тому батарея з маркуванням 3S, має номінальне значення

$$V_n = 3 \cdot 3,7 \text{ В} = 11,1 \text{ В} \quad (3.1)$$

Ємність акумуляторної батареї вимірюється в ампер-годинах (Аг). Батареїні блоки для безпілотних літальних апаратів середнього розміру складають 2000 мАг-3000 мАг.

Чим вища ємність, тим довше час польоту, але тим важче буде сам акумулятор. Середній час польоту звичайного безпілотника близько 20-30 хвилин, що може здатися недовгим, але варто враховувати, що він бореться з гравітацією, і на відміну від літака, не має поверхонь, які б допомогли з підйомом.

Акумулятор Turnigy Heavy Duty 5000 мАг 3S1P 60С (рис. 3.3) має високу ємність, велику потужність і високу швидкість розряду.



Рис. 3.3. Акумулятор Turnigy Heavy Duty 5000 мАг 3S1P 60С

Основні характеристики:

- Ємність: 5000 мАг
- Конфігурація: 3S1P / 11.1В / 3 комірки
- Струм розрядки: 25С
- Піковий струм розрядки: 30С (до 10 сек)
- Маса: 412 грам
- Розміри: 146 x 50 x 25 мм
- Роз'єм балансування: JST-ХН
- Силовий роз'єм: ХТ-90

3.4. Вибір двигунів

Використані мотори матимуть величезний вплив на корисне навантаження (максимальне навантаження), яке може витримувати БПЛА, а також на час польоту.

Безщіткові (безколекторні) мотори від SunnySky X2212 KV980 II (рис. 3.4) мають високу продуктивність та потужність. Кожен двигун ретельно збалансований і протестований на заводі.



Рис. 3.4. Двигун SunnySky X2212 KV980 II

Основні характеристики моторів наведені в таблицях 3.1. та 3.2.

Значення KV двигуна визначає те, як швидко він буде обертатись при даній напрузі. Для більшості багатороторних літаків бажане низьке значення KV (наприклад, від 500 до 1000), оскільки це сприяє стабільності.

Таблиця 3.1.

Технічні характеристики мотора SunnySky X2212 KV980 II

KV (обертів за хвилину на 1 В)	980 об./хв/В
Діаметр статора	22 мм
Висота статора	12 мм
Діаметр вала	3 мм
Вага	56 гр
Кількість комірок акумулятора	2-3 S
Максимальний безперервний струм	15 А
Максимальна безперервна потужність	150 Вт
Максимальний ефективний струм	7-12 А
Внутрішній опір	126 мΩ

Таблиця 3.2.

Певні параметри, розраховані для рекомендованих пропелерів

Пропелер	Напруга, В	Струм, А	Потужність, Вт	Тяга, гр	Ефективність, гр/Вт
9мм x 4,7	8,5	6,5	55	420	7,63
	10	8,2	82	560	6,82
	11,1	9,6	106,5	680	6,38
	12	11	132	740	5,6
10мм x 4,5	7,4	7,4	54,7	480	8,77
	8	8,2	65,6	520	7,9
	10	11,2	112	720	6,42
	11,1	13,2	146,5	870	5,93
11мм x 4,5	8,5	12	102	680	6,66
	10	14,2	142	880	6,19
	11,1	17,2	190,9	960	5,02

Згідно таблиці 3.1. KV для обраного двигуна становить 980 об./хв./В. Обраний акумулятор містить 11,1 В, а це означає, що можна розрахувати частоту обертання мотора при даній напрузі за формулою:

$$\vartheta_{об} = V_{bat} \cdot KV = 11.1 \text{ В} \cdot 980 \frac{\text{об.}}{\text{В}} = 10878 \frac{\text{об.}}{\text{хв.}}, \quad (3.2)$$

де V_{bat} – напруга акумулятора;

KV – кількість обертів за хвилину на 1 В напруги акумулятора.

Також доцільно розрахувати максимальну вагу яку можуть підняти обрані двигуни. Так як використовуються пропелери 10мм x4,5 з таблиці 3.2. можна взяти розраховане виробником значення максимальної тяги при акумуляторі з напругою 11,1 В.

Таким чином, за формулою 2.2 максимальна тягова вага:

$$M_{lift} = Tr_{nom} \cdot N_{eng} = 0.87\text{кг} \cdot 4 = 3,48\text{кг}, \quad (3.3)$$

де Tr_{nom} – максимальна тяга двигуна з пропелером 10мм x4,5;

N_{eng} – кількість двигунів.

Це значення маси означає, що, якби коптер важив 3,48 кг, то він злітав би тільки при максимальній тязі. В такому випадку необхідно обирати

комбінацію двигун плюс гвинт, що забезпечить велику тягу, або ж зменшити вагу квадрокоптера.

Якщо силова установка (всі двигуни і підпорки) може забезпечити тягу в 3,48 кг (макс.), в такому випадку вага всього дрона має складати не більше половини розрахованої (1.74 кг, враховуючи вагу самих двигунів).

По завершенню повного монтування складових квадрокоптера його вага склала 1314 гр, що є допустимою вагою при розрахованій максимальній. Виходячи з цього значення, можна розрахувати тягу кожного двигуна при цій вазі дрона:

$$Tr = \left(\frac{M}{N_{eng}} \right) \cdot 2 = \left(\frac{1.314 \text{ кг}}{4} \right) \cdot 2 = 0.657 \text{ кг}, (3.4)$$

де M – вага квадрокоптера включаючи раму, мотори, електроніку, акумулятор, аксесуари і т. Д.;

N_{eng} – кількість двигунів.

Отримане значення тяги менше за максимальне, розраховане виробником, а тому можна розраховувати на стабільний політ.

3.5. Польотний контролер

Pixhawk (рис. 3.5) – це нова просунута система автопілота, побудована на базі проекту з відкритим кодом PX4 і розроблена компанією 3D Robotics. Серед основних переваг можна відзначити швидкий потужний 32-розрядний процесор і сенсори від відомої компанії ST Microelectronics. Операційна система реального часу NuttX забезпечує неймовірну продуктивність, гнучкість і надійність при **управлінні**.

За функціоналом плата Pixhawk перевершує всіх конкурентів (Naza, Rabbit, KK, MicroKopter, XAircraft та ін.). Хоча проект АРМ, який веде та ж група розробників, продовжує розвиватися паралельно (тобто більшість нових функцій з'являються і в АРМ, і в Pixhawk), очевидно, що з часом Pixhawk прийде йому на повну заміну.



Рис. 3.5. Польотний контролер Pixhawk 2.4.5

Перевагами плати Pixhawk є: вбудована багатопоточність, Unix / Linux-подібне оточення, повністю нові функції автопілота, такі як Lua-скриптинг для місій і поведінки в польоті.

Основний модуль Pixhawk може бути розширений додатковими опціями, такими як цифровий датчик повітряної швидкості, підтримкою зовнішніх різнокольорових світлодіодних індикаторів, зовнішнього компаса та ін. **Вся периферія автоматично визначається і конфігурується.**

Основні характеристики:

- Розмір: 81x44x15mm
- Вага: 33.1g

Датчики:

- 3-вісний 16-ти розрядний гіроскоп ST Micro L3GD20 3-вісь,
- 3-вісний 14 акселерометр / магнітометр ST Micro LSM303D
- 3-вісний акселерометр / гіроскоп MPU 6000
- Барометр MEAS MS5611

Інтерфейси:

- 5x UART (послідовні порти)
- 2x CAN
- Spektrum DSM / DSM2 / Супутник DSM-X® сумісний вхід до DX8 (DX9 і вище не підтримує)
- Futaba S.BUS® сумісний вхід і вихід
- PPM сигнал

- RSSI (PWM або напруга) вхід
- I2C
- SPI
- 3.3 і 6.6-вольт входи АЦП
- Порт microUSB

3.6. Апаратура управління

Апаратура радіоуправління авіамоделями 10к Radiolink AT9S (рис. 3.6) з приймачем R9DS - оновлена версія RadioLink AT9S – це одна з найновіших і найпопулярніших радіоапаратів. Підтримує передачу 10 каналів.

Велика дистанція управління (більше 2 км радіусу дії).

Підтримка телеметрії (при використанні телеметрійних модулів). Підтримка оновлень прошивки по USB кабелю. Трансмітер може працювати в режимі симулятора через підключення до комп'ютера по USB-кабелю. На пульті є 4 трьохпозиційні перемикача, 4 двопозиційні, 1 ресет світч, 4 потенціалометри (два позаду апаратури для управління камерою підвісу).



Рис. 3.6. Апаратура управління 10к Radiolink AT9s з приймачем R9D
SBUS

Характеристики:

- Розміри пульта: 183x100x193 мм

- Вага: 0,88 кг
- Струм споживання: 90мА при 12В
- Напруга живлення: 7,4 - 18В
- Радіус управління: більше 900 м на землі і 1500 м в повітрі (реальні характеристики залежать від польотних умов)
- Кількість каналів: 10, 5-й – 10-й канали налаштовуються
- Екран: 2,8 "240x320 пікселів
- Підтримувані приймачі: R6DS, R9DS і R10DS
- Частота передачі: 2,4 ГГц (2400,0-2483,5 МГц)
- Модуляція: QPSK
- Ширина діапазону: 5,0МГц / 250 кбіт / с
- Розширення спектру: DSSS і FHSS
- Поділ каналів: не менше 38 дБ / мВт
- Потужність передавача: до 100мВт (20 дБ / мВт)

3.7. Пропелери

Пропелери для багатороторних літальних апаратів адаптовані з гвинтів, що використовуються в РС літаках. Більшість пропелерів для БПЛА мають дві або три лопоті, але найбільш поширені – з двома. Більша кількість лез не призводить до збільшення тяги.

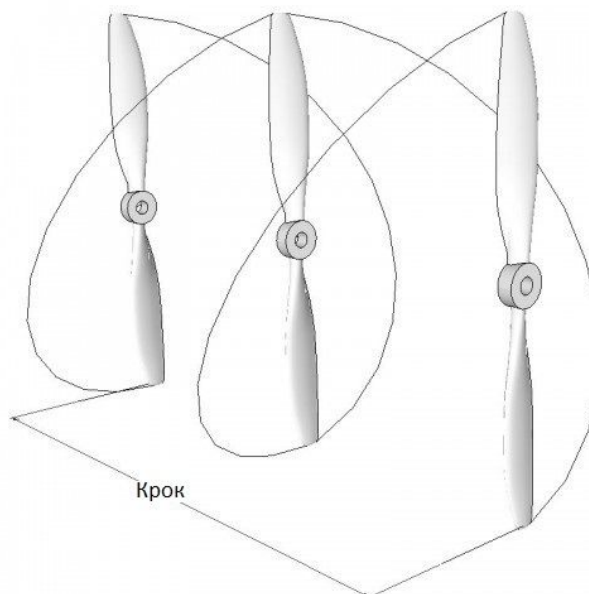


Рис. 3.7. Крок пропелера

Тяга, створювана пропелером, залежить від щільності повітря, числа обертів гвинта, його діаметра, форми і площі лопатей і кроку (рис. 3.7). Ефективність гвинта пов'язана з кутом атаки (рис. 3.8), який визначається як крок лопаті мінус кут спіралі (кут між результуючою відносною швидкістю і напрямком обертання лопаті). Сама ефективність – це відношення вихідної до вхідної потужності.

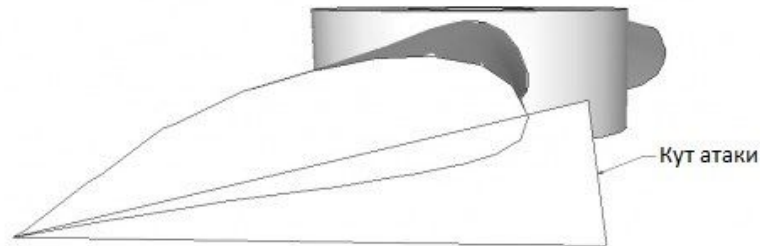


Рис. 3.8. Кут атаки пропелера

Більшість, добре спроектованих гвинтів, мають ККД понад 80%. На кут атаки впливає відносна швидкість, тому пропелер буде мати різну ефективність при різних швидкостях двигуна. На ефективність також сильно впливає передній край лопаті гребного гвинта, і дуже важливо, щоб він був якомога більш гладким.



Рис. 3.9. Пропелери 10x4.5 від HobbyKing

Враховуючи вищеописані характеристики та вимоги двигунів, були обрані пропелери 10x4.5 від HobbyKing (рис. 3.9), виготовлені з досить міцного пластику та непогано збалансовані.

3.8. Збір рами та пропаювання плати розподілу живлення

Перед збиранням рами слід пропаяти плату розподілу живлення, як показано на рисунку 3.10. Після чого необхідно припаяти конектор живлення (рис. 3.11) та чотири регулятори ходу на відповідні місця (рис. 3.12).

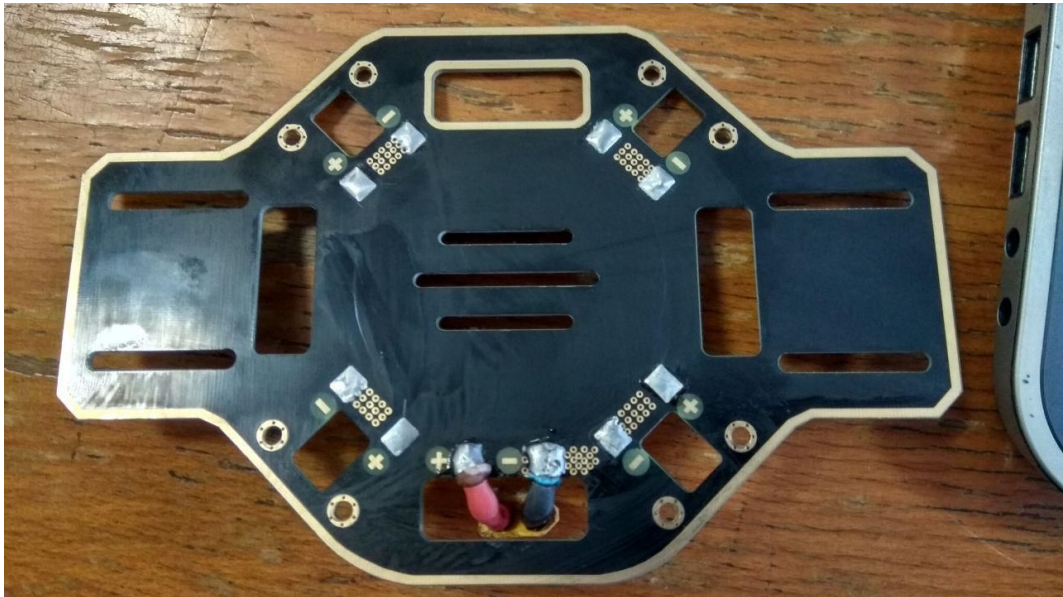


Рис. 3.10. Пропаєна плата розподілу живлення



Рис. 3.11. Конектор живлення

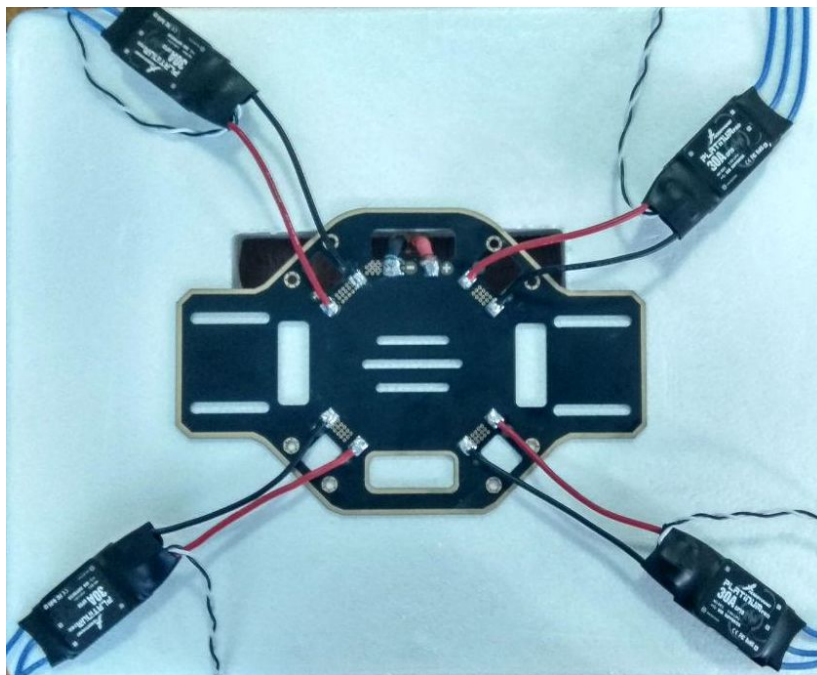


Рис. 3.12. Регулятори ходу, припаяні до плати розподілу живлення
Після виконання даної підготовки, було зібрано раму згідно рисунка 3.1 та розміщено на неї мотори.

3.9. Розміщення двигунів та їх підключення до контролерів швидкості
Обрані двигуни розміщуються на відповідних місцях рами (рис. 3.13).

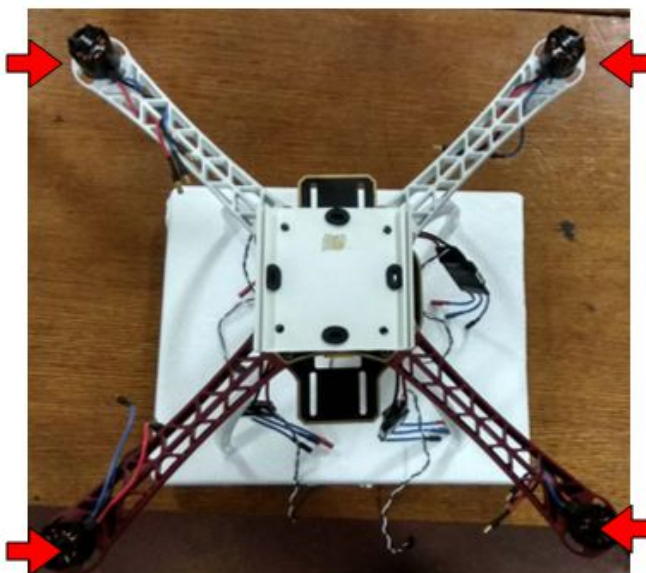


Рис. 3.13. Розміщення двигунів на рамі

Слід зауважити, що двигуни променів на одній лінії мають обертатися в оберненому напрямку від інших двох двигунів (рис. 3.14).

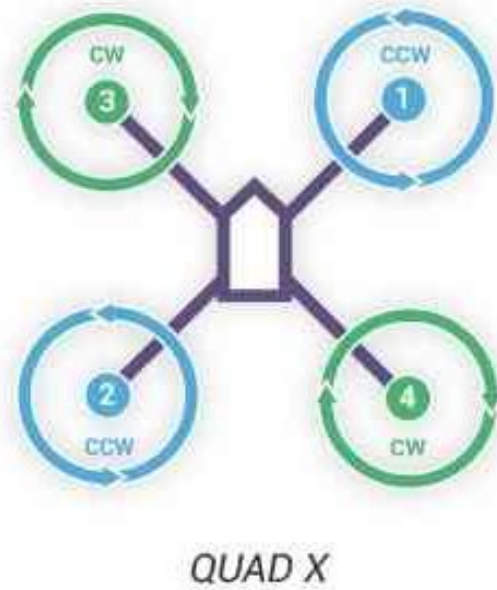


Рис. 3.14. Схема напрямків обертання двигунів квадрокоптера типу «X»

Для цього необхідно інвертувати підключення кабелів живлення та заземлення до регуляторів швидкості у двигунах 1 та 2. Було закріплено регулятори швидкості до променів відповідним чином за допомогою затяжок.

3.10. Підготовка та розміщення акумулятора

Для обраного акумулятора необхідно скласти перехідник з роз'єму XT90 на роз'єм XT60 (рис. 3.15), так як конектор акумулятора не підходить до конектора кабеля розподілу живлення контролера польоту.

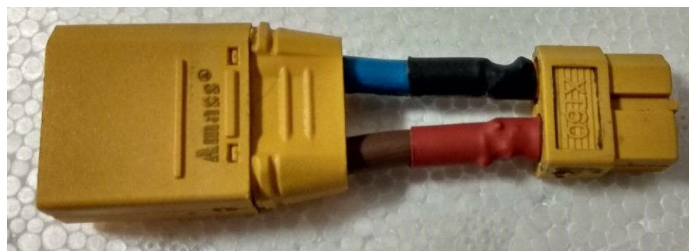


Рис. 3.15. Перехідник з роз'єму XT90 на роз'єм XT60



Рис. 3.16. Розміщення акумулятора на рамі

Приєднано акумулятор на платформу-підставку, і встановлено його у відповідне місце на рамі, де його було закріплено затяжками (рис. 3.16).

3.11. Монтування антивібраційної платформи та кріплення контролера польоту

Антивібраційна платформа є необхідним елементом в побудові дрона, так як надзвичайно важливим є стабільне та вібростійке кріплення контролера польоту.

Для квадрокоптера була використана готова антивібраційна платформа, але також була розроблена власна антивібраційна платформа. Після проведених випробувань різниця виявилась несуттєвою, тому доцільним є використання будь якої з них.

Контролер польоту важливо закріпити надійно і правильно зорієнтувати відносно лінії горизонту за допомогою лінійки-рівня.

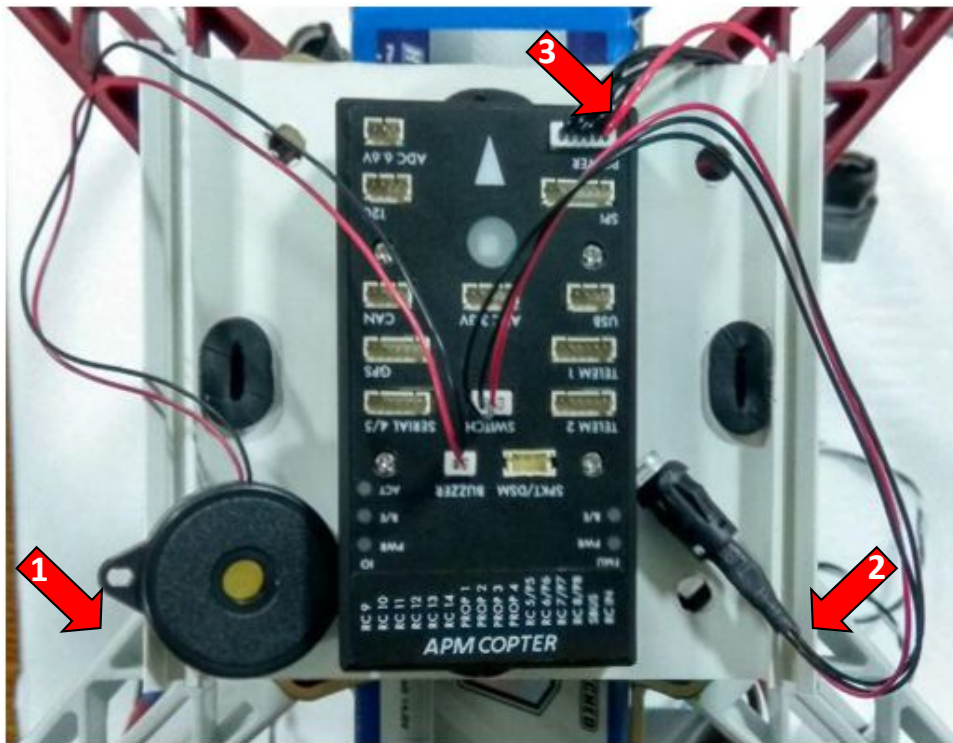


Рис 3.17. Підключення звукового елемента (1), кнопки (2) та кабеля живлення (3)

На даному етапі приєднуємо до Pixhawk звуковий елемент, кнопку і коннектор кабеля живлення, що йдуть з ним в комплекті (рис 3.17).

3.12. Налаштування та підключення приймача радіоуправління

Для початку необхідно прив'язати RC приймач R9D SBUS (рис. 3.6) до пульта керування. Для цього достатньо увімкнути пульт, натиснути та тримати кнопку прив'язки на приймачі (рис. 3.18) та подати живлення на приймач на відповідні піни. Червоний світлодіодний індикатор загориться і почне мерехтіти, як тільки воно зупиниться. Це означатиме, що прив'язка пройшла успішно.



Рис. 3.18. Кнопка прив'язки та переключення режимів роботи

Для правильної роботи RC приймача потрібен PPM енкодер (рис. 3.19), який отримує на вході до восьми каналів звичайного PWM (ШИМ) сигналу від приймача і кодує його в сигнал PPM. Пультний контролер Pixhawk має вхід тільки для PPM сигналу. В свою чергу приймач R9D не має такого виходу, а має окремий вихід на кожний канал.



Рис. 3.19. PPM енкодер

Правильне підключення PPM енкодера до RC приймача зображено на рисунку 3.20.

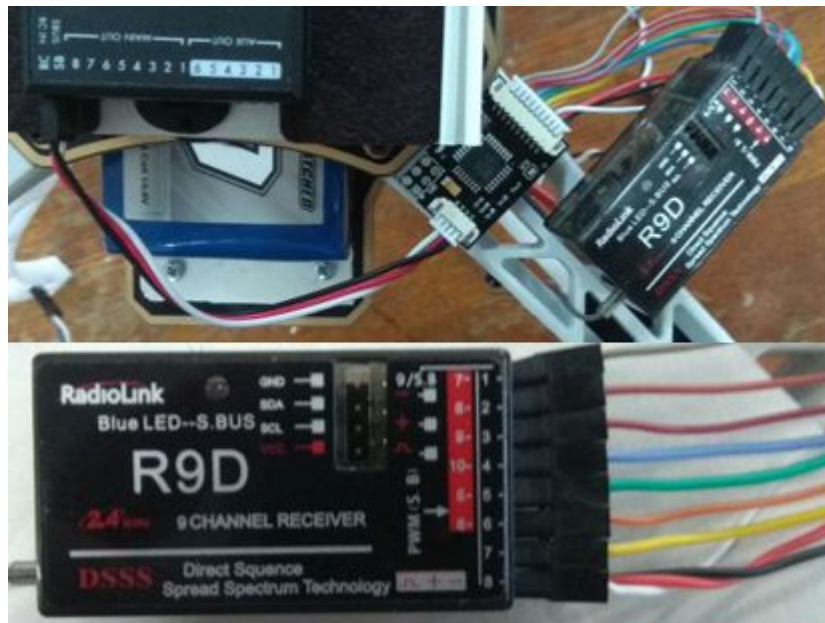


Рис. 3.20. Підключення PPM енкодера до RC приймача

3.13. Підключення контролерів швидкості з відповідними двигунами до контролера польоту

Надзвичайно важливим є правильна послідовність підключення контролерів швидкості з двигунами до контролера польоту, так як це напряду впливає на можливість квадрокоптера літати.

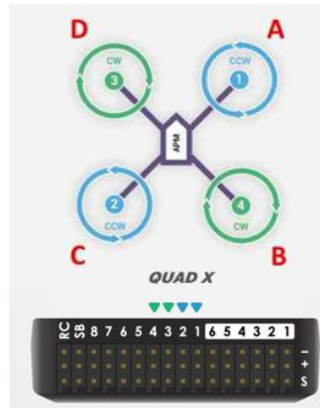


Рис. 3.21. Схема розміщення двигунів та підключення відповідних контролерів швидкості до Pixhawk

Схема розміщення двигунів наведена на рисунку 3.21 та підключення відповідних контролерів швидкості до Pixhawk.

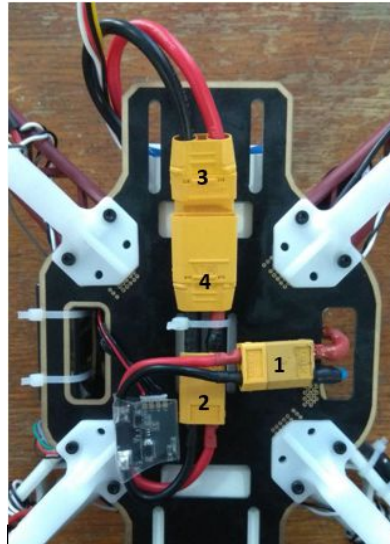


Рис. 3.22. Підключення конекторів живлення. (1) Між платою розподілу живлення та кабелем контролера польоту; (2) Між кабелем контролера польоту та акумулятором; (3) через перехідник XT90 на XT60 (4);

Також на даному етапі з'єднуємо конектор плати розподілу живлення з кабелем розподілу живлення Pixhawk, куди, в свою чергу, буде підключатись акумулятор (рис. 3.22).

3.14. Монтаж пропелерів

Перш ніж кріпити пропелери до двигунів слід перевірити їх збалансованість. Для цього використовувався спеціальний балансир. Обрані пропелери закріплюються між затискачами, як показано на рисунку 3.23.



Рис. 3.23. Балансир із закріпленням на ньому пропелером

Якщо одна з половин пропелера переважає іншу, то задля урівноваження наносимо на неї прозорий лак. Продовжуємо робити це до тих пір, поки гвинт не займе горизонтальне положення.

Встановлюємо пропелери на спеціальні кріплення, які йдуть в комплекті з двигунами, заздалегідь вмонтувавши їх на двигуни за допомогою гвинтів (рис. 3.24).



Рис. 3.24. Кріплення без та з пропелером

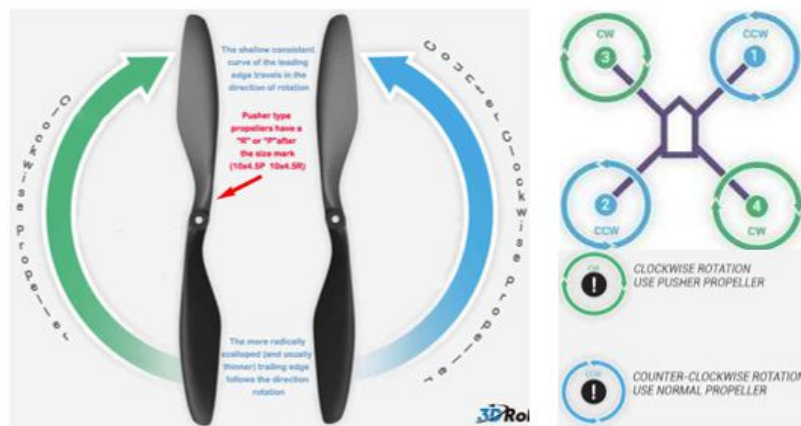


Рис. 3.25. Напрями обертання двигунів та відповідні пропелери

Слід зауважити, що правильне розміщення пропелерів вкрай важливе, тому слід це робити згідно напрямку обертання двигунів (рис 3.25).

4. СТАБІЛІЗАЦІЯ КВАДРОКОПТЕРА ТА НАЛАШТУВАННЯ ПІД РЕГУЛЯТОРА

Для подальших дій необхідно скачати на офіційному сайті та встановити програмний продукт Mission Planner. Mission Planner – це станція наземного управління для БПЛА. Вона сумісна лише з Windows. За допомогою Mission Planner можна здійснювати налаштування низькоріневої прошивки БПЛА для оптимальної роботи, завантажувати журнал місій, створених автопілотом.

4.1. Початкові налаштування та встановлення ОС на Pixhawk

Покроковий опис дій:

1. Запускаємо Mission Planner;
2. Підключаємо Pixhawk до комп'ютера за допомогою USB кабеля;
3. Переходимо в пункт меню Initial setup та обираємо підпункт Install Firmware (рис. 4.1);

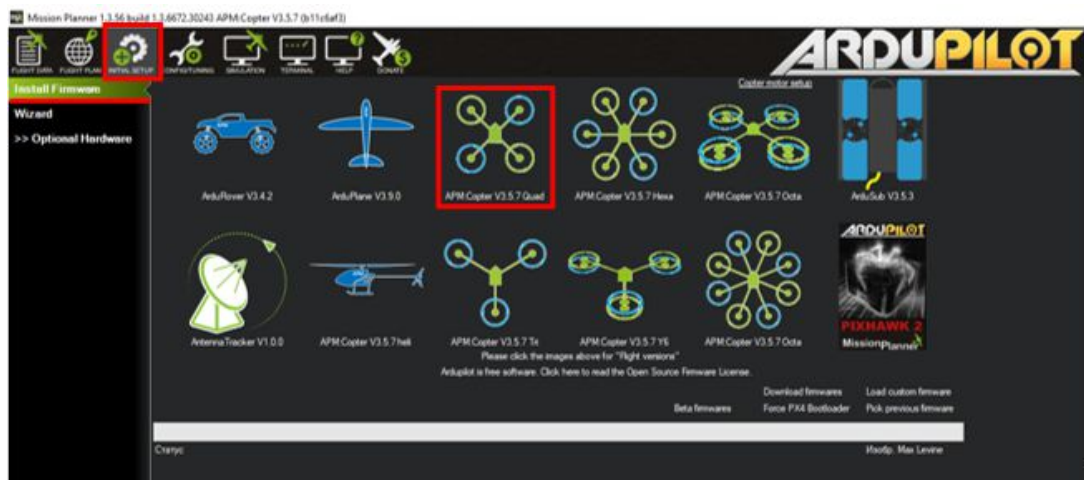


Рис. 4.1. Пункт меню Initial setup

4. Обираємо пункт APM Copter V3.5.7 Quad;
5. Програма запропонує від'єднати USB кабель, натиснути ОК і під'єднати USB кабель знову. Після чого почнеться встановлення ОС на контролер польоту (рис. 4.2);

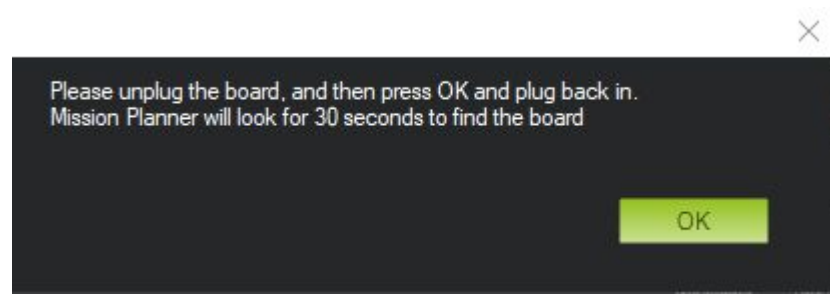


Рис. 4.2. Вікно підтвердження початку встановлення ОС

6. Після завершення установки, натискаємо кнопку Connect та переходимо в підпункт Wizard (рис. 4.3);

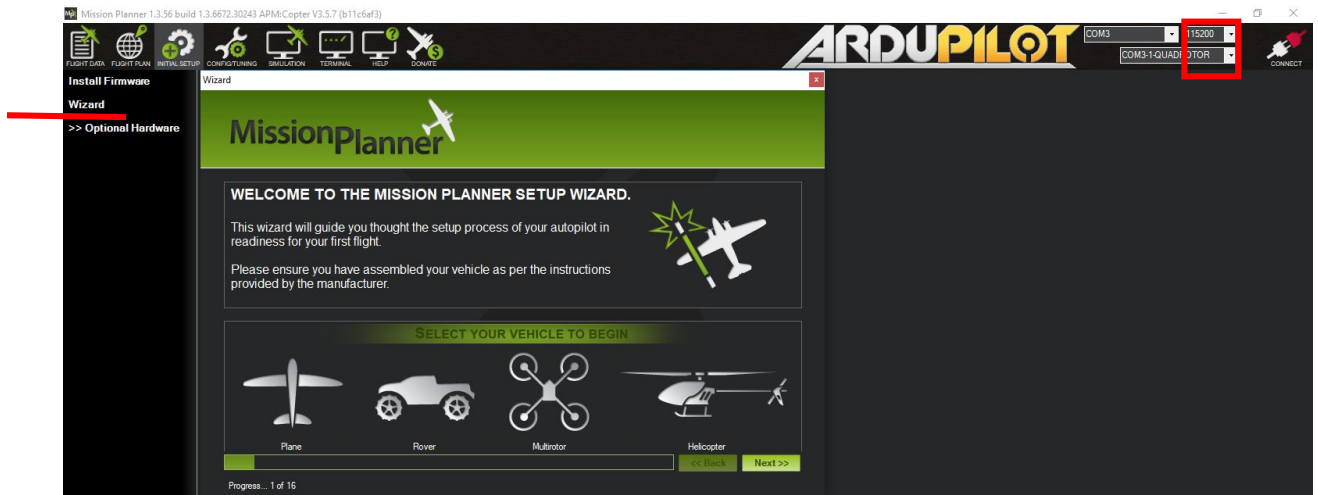


Рис. 4.3. Підпункт Wizard та кнопка Connect

7. У вікні Wizard обираємо пункт Multirotor, потім обираємо чотири променевий тип рами (рис. 4.4) ;

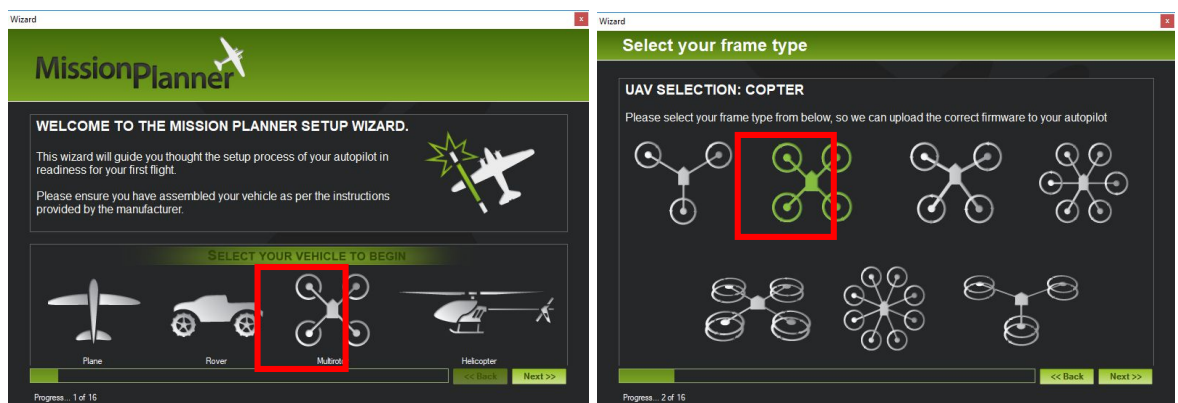


Рис. 4.4. Вибір пунктів Multirotor та чотири променевий тип рами

4.2. Налаштування датчиків польотного контролера.

Проводимо калібровку акселерометра. Для цього достатньо виконувати дії вказані на ілюстраціях (рис. 4.5 – 4.10);

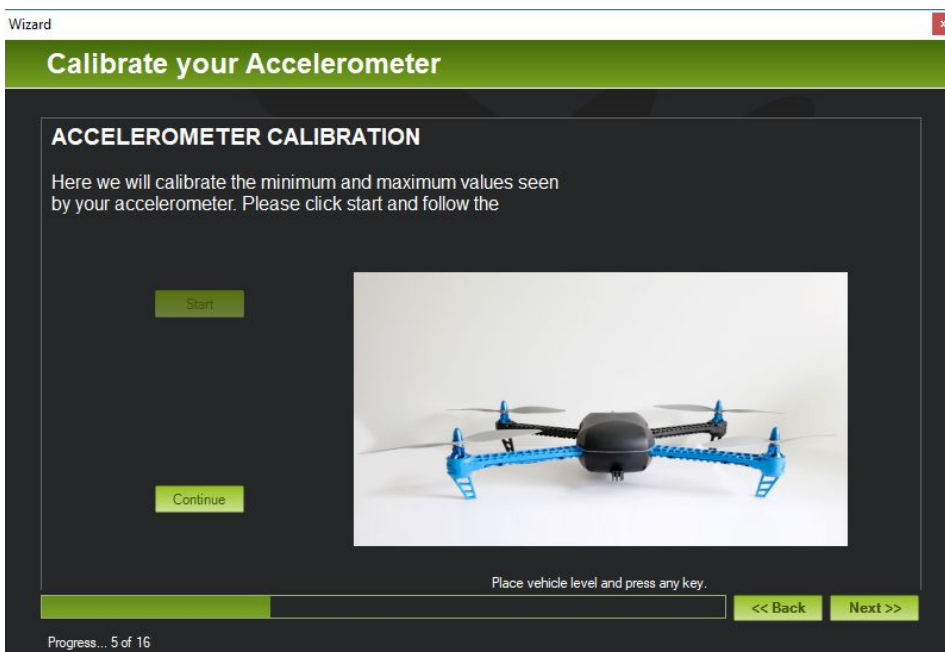


Рис. 4.5. Вікно калібровки пропонує поставити апарат на рівну поверхню

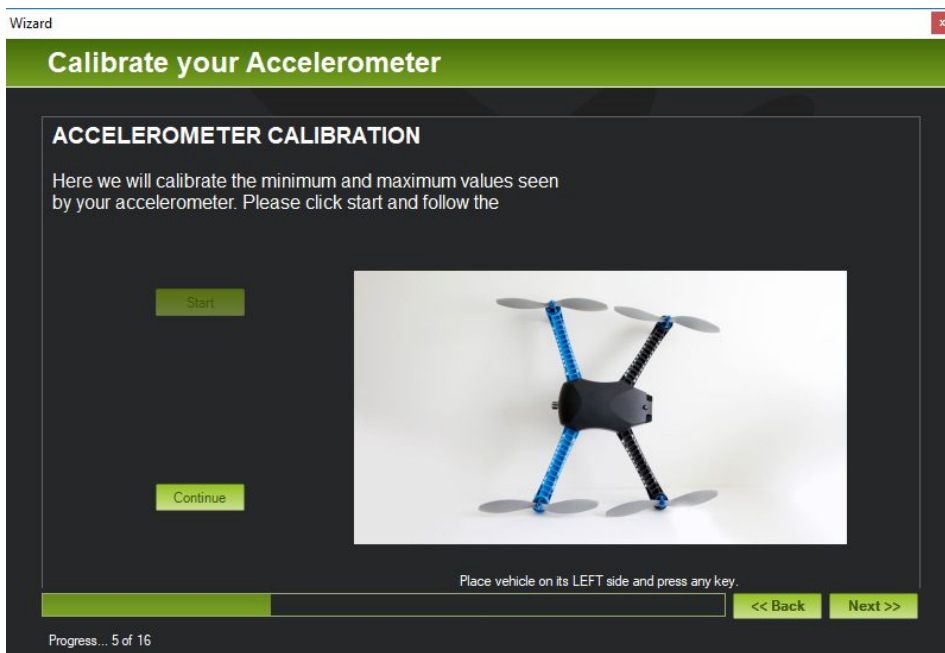


Рис. 4.6. Вікно калібровки пропонує поставити апарат на лівий бік

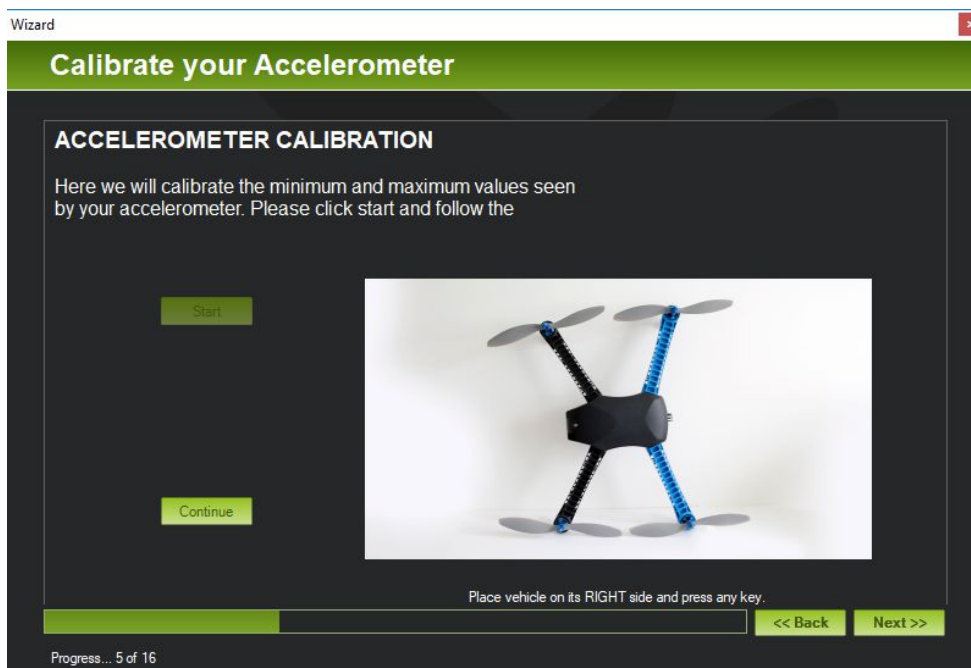


Рис. 4.7. Вікно калібровки пропонує поставити апарат на правий бік

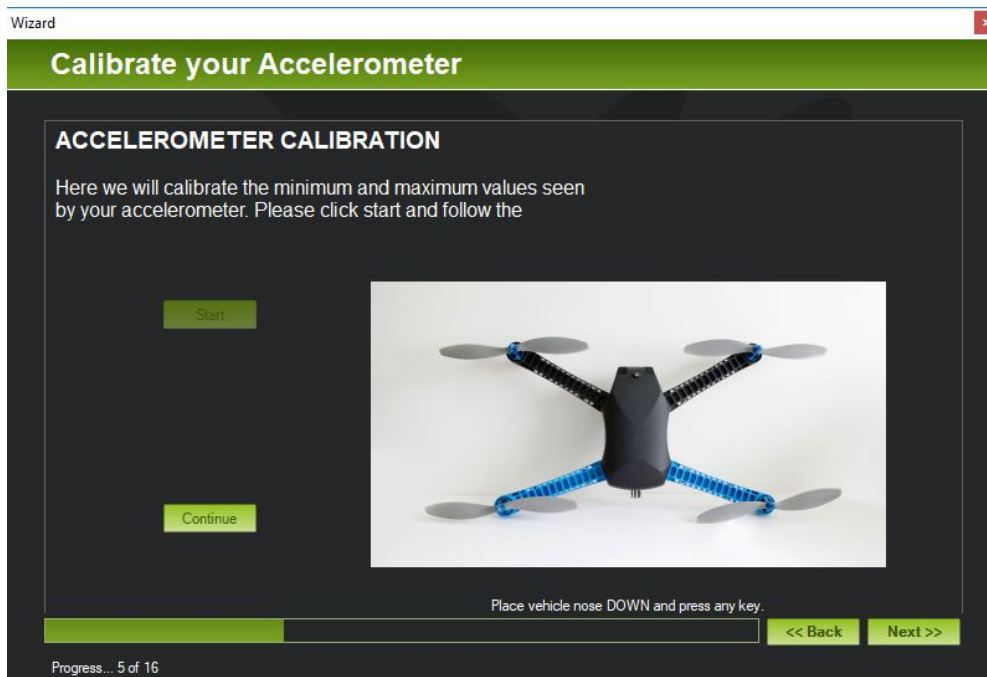


Рис. 4.8. Вікно калібровки пропонує поставити апарат носовою частиною

ВНИЗ

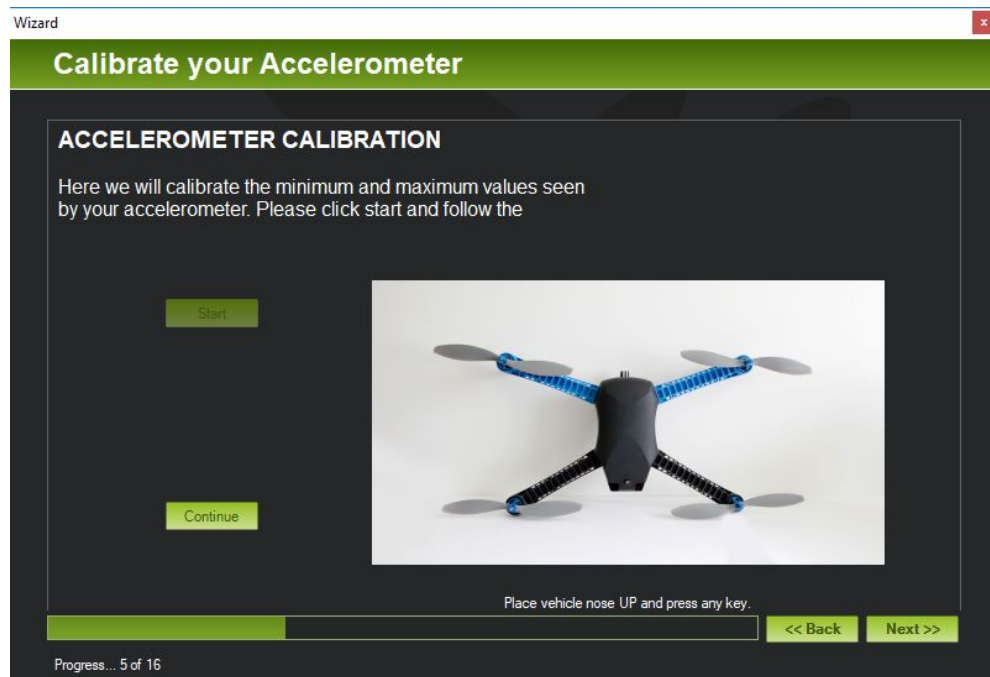


Рис. 4.9. Вікно калібровки пропонує поставити апарат носовою частиною
вверх

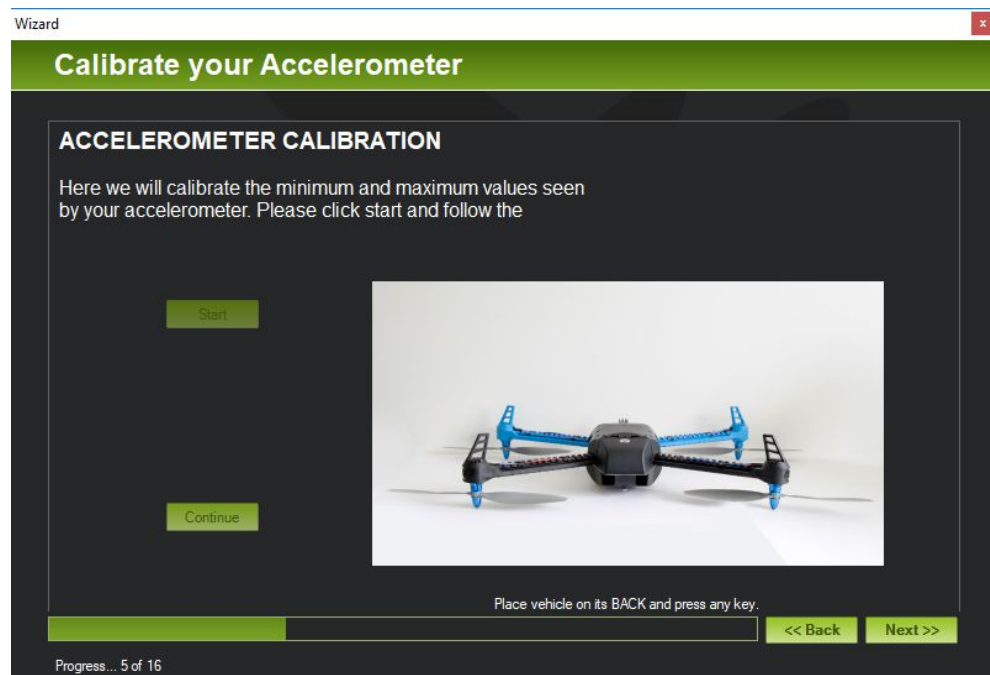


Рис. 4.10. Вікно калібровки пропонує поставити апарат гвинтами до низу
Наступним кроком буде калібровка компаса. Натискаємо кнопку Live calibration, прибираємо відмітку Use Auto Assert (рис. 4.11) і повертаємо кавдрокоптер по кожній з осей (рис. 4.12). Має вийти графік приблизно, як на рисунку 4.13.

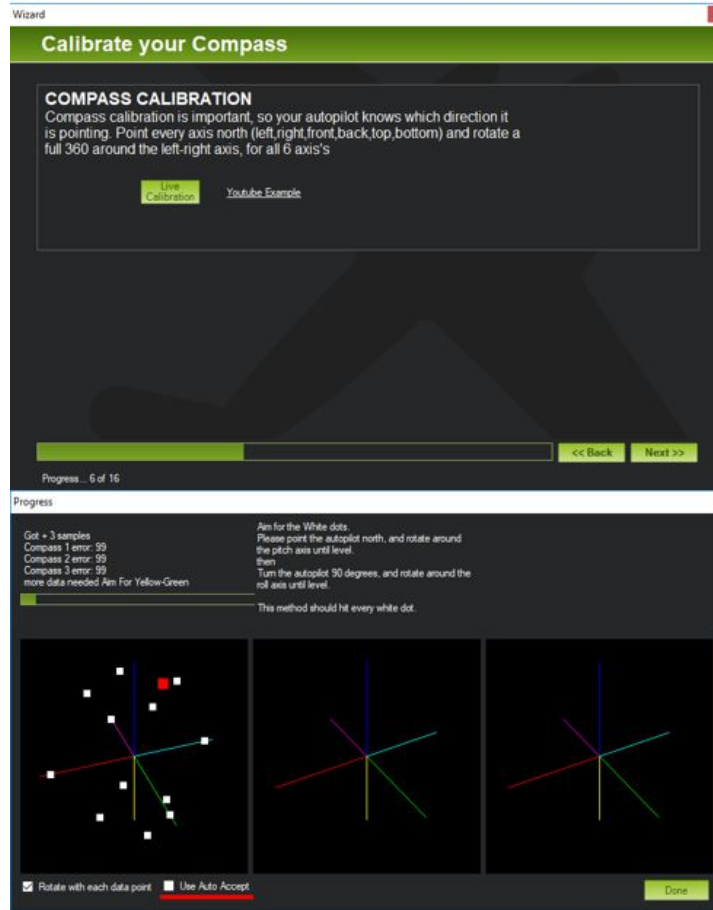


Рис. 4.11. Вікна калібровки компаса

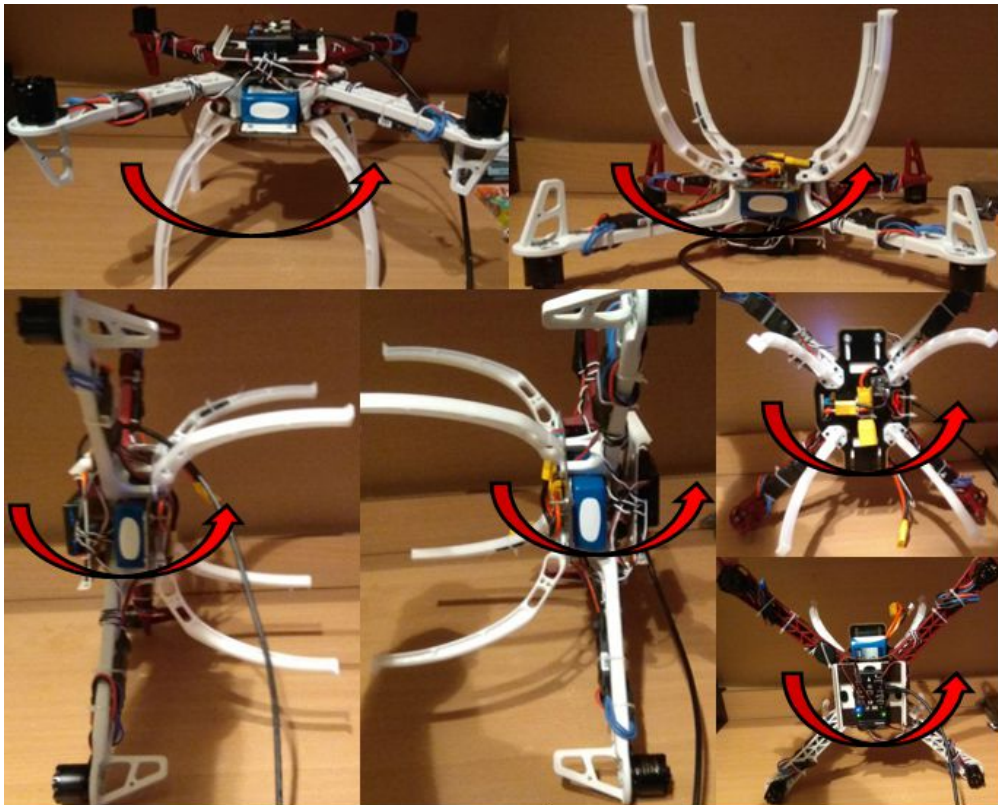


Рис. 4.12. Осі, за якими слід обертати квадрокоптер, для калібрування компаса

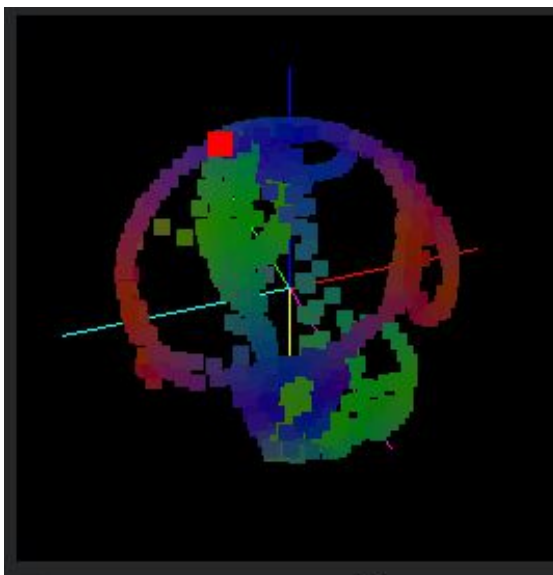


Рис. 4.13. Кінцевий графік заповнення осей точками калібрування

В наступному вікні в першому випадіючому списку обираємо пункт Pixhawk, наступний залишаємо без змін. В останньому вписуємо ємність акумулятора, що використовується. В даному випадку – 5000 мАг (рис. 4.14);

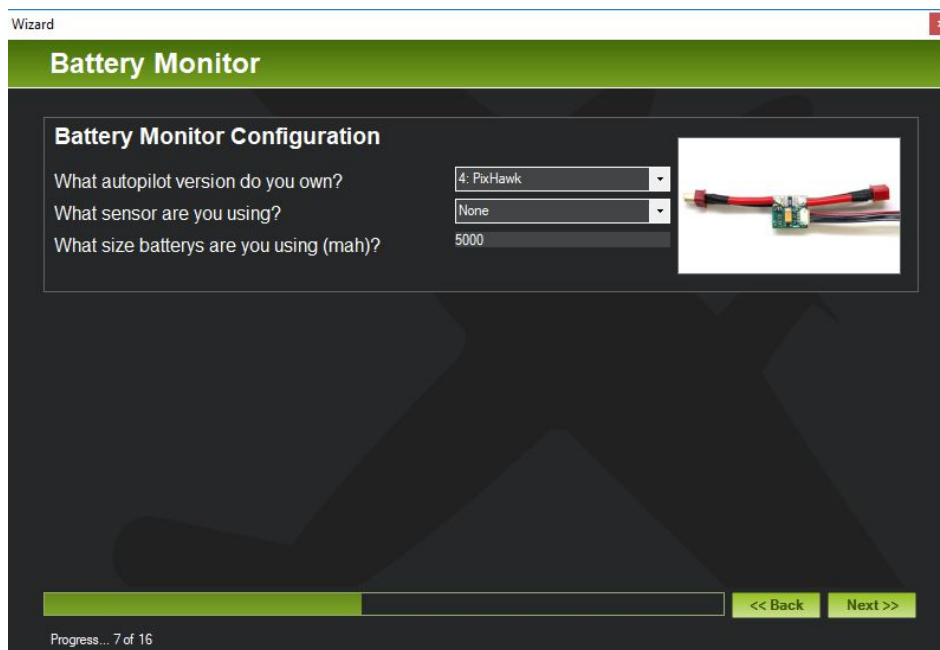


Рис. 4.14. Вікно Battery monitor configuration

У вікні Optional Items залишаємо все без змін (рис. 4.15);

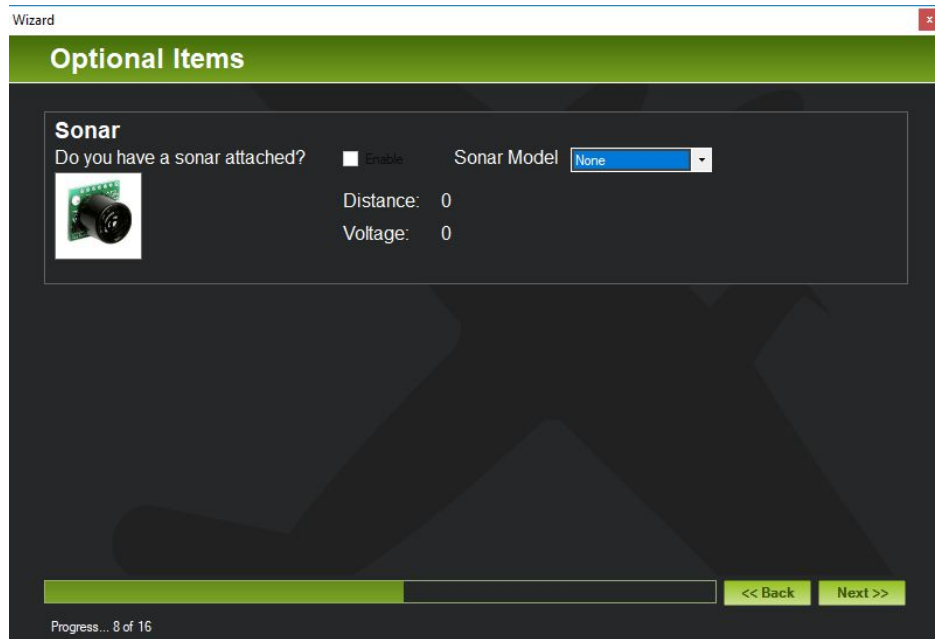


Рис. 4.15. Вікно Optional Items

У вікні Radio calibration натискаємо Continue, після чого з'являється вікно Radio endpoint calibration, де натискаємо Calibrate radio. Після цього потрібно задіяти по максимуму всі важелі пульта керування, які прив'язані до каналів з 1-го по 8-й (рис. 4.16);



Рис. 4.16. Вікна Radio endpoint calibration

У вікні Flight Modes у випадаючому списку Flight mode 1 обираємо Loiter, Flight mode 4 - Stabilize, Flight mode 4 - AltHold (рис. 4.17);

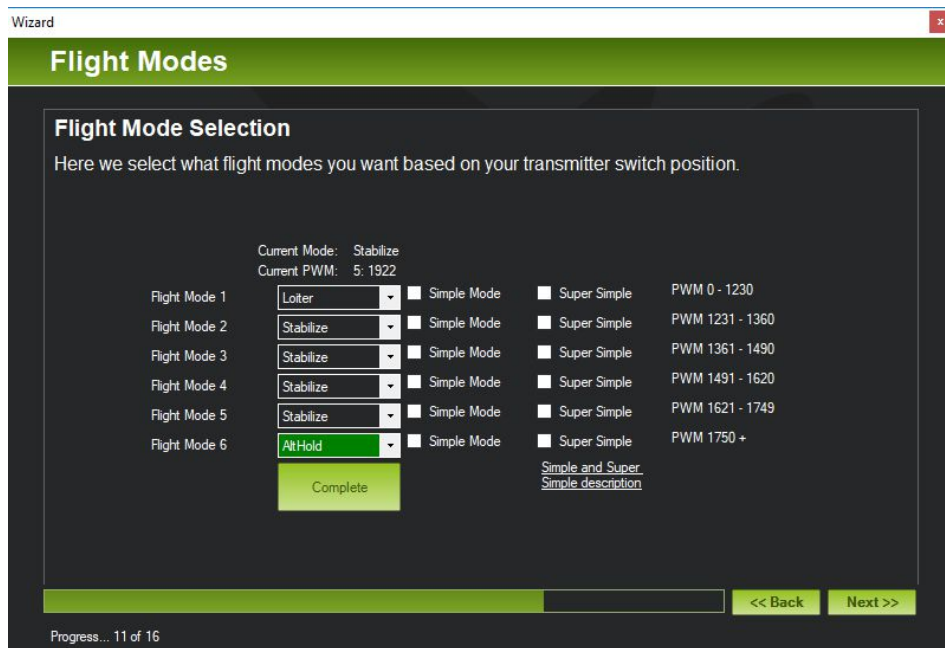


Рис. 4.17. Вікно Flight Mode Selection

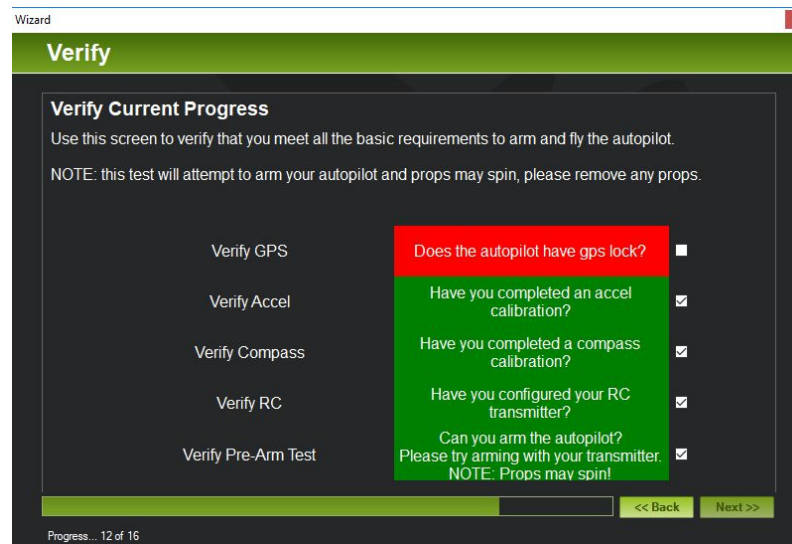


Рис. 4.18. Вікно Verify Current Progress

У вікні Verify робимо Pre-Arm Test. Для цього необхідно одночасно затиснути Safe Button та нахилити важіль тяги в нижній правий край, після чого пункт Verify Pre-Arm Test підсвітиться зеленим (рис. 4.18).

4.3. Налаштування Failsafe та програмування регуляторів ходу

Після завершення попередньої калі бровки, переходимо в пункт Mandatory Hardware . Там переходимо в підпункт Failsafe. В налаштуванні під назвою Battery у випадяючому списку Low Battery вписуємо значення 10,5, в Reserved mAh вписуємо – 800 та в останньому випадяючому списку обираємо Land (рис. 4.19).



Рис. 4.19. Налаштування параметра Failsafe

Далі переходимо до параметра ESC Calibration (рис. 4.20). Після натискання Calibrate ESCs потрібно відключити USB та батарею, підняти важіль тяги догори, увімкнути батарею. Коли світлодіод почне мерехтати червоним, зеленим та синім кольором, потрібно натиснути Safe Button на квадрокоптері. Регулятори швидкості просигналізують двома короткими гудками – це означає, що верхня точка тяги знайдена. Після цього потрібно опустити важіль тяги вниз. На цю дію регулятори просигналізують трьома короткими гудками (це означає, що використовується 3-комірочна батарея) та одним довгим.

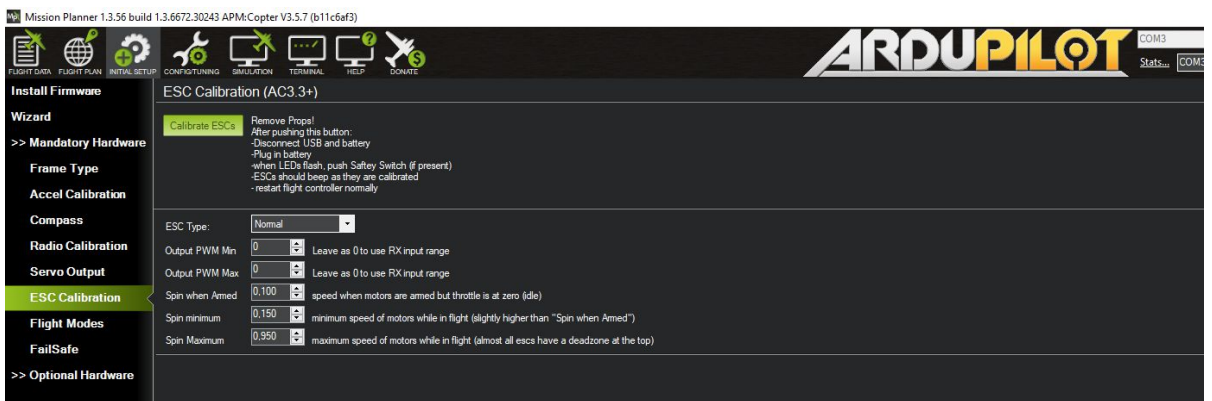


Рис. 4.20. Вікно параметра ESC Calibration

Відключаємо батарею і повторюємо дії, описані вище, включно до натискання Safe Button. Очікуємо 4-5 секунд, регулятори швидкості просигналізують спеціальним звуковим сигналом про те, що ми увійшли в режим програмування. Далі, керуючись сигналами та таблицями (рис. 4.21), чекаємо переходу на п'ятий рядок, опускаємо важіль тяги, далі чекаємо переходу на 3 стовпчик і піднімаємо важіль тяги. Чекаємо переходу на

дванадцятий рядок опускаємо важіль тяги, чекаємо переходу на 3 стовпчик і піднімаємо важіль тяги. Виходимо з режиму програмування, перейшовши на чотирнадцятий рядок, після чого знову опускаємо важіль тяги.

2. Select programmable items			3. Set item value (Programmable value)									
After entering program mode, you will hear 14 groups of "Beep" tones in a loop with the following sequence. If you move the throttle stick to bottom position within 3 seconds after one kind of tones, the corresponding item will be selected.			You will hear several "Beep" tones in loop. Set the value matching to a tone by moving the throttle stick to top position when you hear the tone, then a special tone "1515" emits, that means the value is set and saved. (Keep the throttle stick at the top position, you will go back to Step #2 and you can select other items; Or Move the stick to bottom position within 2 seconds will exit program mode directly)									
1	B	Brake	(1 short tone)	Beep	1 short	2 short	3 short	4 short	1 long	1 long 1 short	1 long 2 short	1 long 3 short
2	BB	Battery Type	(2 short tones)	Brake	*Off	Soft	Hard	Very Hard				
3	BBB	Cutoff Mode	(3 short tones)	Battery Type	*LiPo	NiMH						
4	BBBB	Cutoff Threshold	(4 short tones)	Cutoff Mode	*Soft Cut	Hard Cut						
5	Beep---	Start Mode	(1 long tone)	Cutoff Threshold	Low	*Middle	High	Custom				
6	Beep--B	Timing	(1 long 1 short)	Start Mode	*Normal	Soft	Very Soft					
7	Beep---BB	Governor Mode	(1 long 2 short)	Timing	0"	3.75"	7.5"	11.25"	*15"	18.75"	22.5"	26.25"
8	Beep----BBB	Reserved Item #1	(1 long 3 short)	Governor Mode	*Off	Governor Low	Governor High					
9	Beep-----BBBB	PWM Frequency	(1 long 4 short)	Reserved Item #1								
10	Beep---Beep---	Built-in BEC Output	(2 long tones)	PWM Frequency	*12KHz	8KHz						
11	Beep---Beep--B	Reserved Item #2	(2 long 1 short)	Built-in BEC Output	*5.25V	6V						
12	Beep---Beep---BB	Lipo Cells	(2 long 2 short)	Reserved Item #2								
13	Beep---Beep---Beep--B	Reset All To Defaults	(3 long 1 short)	Lipo Cells	*Auto	2S	3S	4S	5S	6S		
14	Beep---Beep---Beep---BB	Exit	(3 long 2 short)		*Auto	5S	6S	8S	10S	12S		

Note: "Beep---" means a long "Beep" tone, "B" means a short "Beep" tone. Usually, 1 long "Beep---" = 5 short "B".

The value with * symbol is the factory-preset value (That is: default value).

а)

б)

Рис. 4.21. Таблиця значень гудків тонера (а), таблиця меню програмування (б)

4.4. Налаштування ПІД регулятора

Pixhawk використовує пропорційні, Інтегральні, Похідні (ПІД) контролери, які є найбільш поширеним методом управління для БПЛА.

Контролери є багаторівневими, що означає, що контролер більш високого рівня передає свої результати до контролера нижчого рівня. Контролер найнижчого рівня – це регулятор швидкості, потім контролер положення. Налаштування ПІД-регулятора повинне виконуватися в тому ж порядку, починаючи з регулятора швидкості, оскільки це вплине на всі інші контролери.

Регулятори швидкості.

Контролер швидкості є внутрішнім контуром з трьома незалежними ПІД-регуляторами для управління напрямками корпусу:

- Контроль повороту по осі X – «Roll» (MC_ROLLRATE_P, MC_ROLLRATE_I, MC_ROLLRATE_D);
- Контроль повороту по осі Y – «Pitch» (MC_PITCHRATE_P, MC_PITCHRATE_I, MC_PITCHRATE_D);
- Контроль повороту по осі Z – «Yaw» (MC_YAWRATE_P, MC_YAWRATE_I, MC_YAWRATE_D).

Параметри та їх значення представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

ПІД параметри регулятора швидкості		
Назва	Опис	Налаштоване значення
MC_ROLLRATE_P (FLOAT)	Зміна П-складової «Roll» Коментар: керуючий вихід для помилки кутової швидкості 1 рад / с.	0.135
MC_ROLLRATE_I (FLOAT)	Зміна І-складової «Roll» Коментар: може бути встановлений для компенсації різниці статичної тяги або зміщення центру ваги.	0.9
MC_ROLLRATE_D (FLOAT)	Зміна Д-складової «Roll» Коментар: малі значення допомагають зменшити швидкі коливання. Якщо значення занадто велике, коливання з'являться знову.	0.0036
MC_PITCHRATE_P (FLOAT)	Зміна П-складової «Roll» Коментар: керуючий вихід для помилки кутової швидкості 1 рад / с.	0.254
MC_PITCHRATE_I (FLOAT)	Зміна І-складової «Roll» Коментар: може бути встановлений для компенсації різниці статичної тяги або зміщення центру ваги.	0.7544
MC_PITCHRATE_D (FLOAT)	Зміна Д-складової «Pitch» Коментар: малі значення допомагають зменшити швидкі коливання. Якщо значення занадто велике, коливання з'являться знову.	0.0092
MC_YAWRATE_P (FLOAT)	Зміна П-складової «Yaw» Коментар: керуючий вихід для помилки кутової швидкості 1 рад / с.	0.415

Продовження таблиці 4.1.

Назва	Опис	Налаштоване Значення
MC_YAWRATE_I (FLOAT)	Зміна І-складової «Yaw» Коментар: може бути встановлений для компенсації різниці статичної тяги або зміщення центру ваги.	0.552
MC_YAWRATE_D (FLOAT)	Зміна Д-складової «Yaw» Коментар: може бути встановлений для компенсації різниці статичної тяги або зміщення центру ваги.	0.00223

Регулятор положення управляє орієнтацією за допомогою наступних параметрів:

- Контроль «Roll» (MC_ROLL_P);
- Контроль «Pitch» (MC_PITCH_P);
- Контроль «Yaw» (MC_YAW_P);

Таблиця 4.2.

П-параметри регулятора положення

Назва	Опис	Налаштоване значення
MC_ROLL_P (FLOAT)	Зміна П-складової «Roll» Коментар: необхідна кутова швидкість X в рад/с для помилки 1 рад.	0.547
MC_PITCH_P (FLOAT)	Зміна П-складової «Pitch» Коментар: необхідна кутова швидкість Y в рад/с для помилки 1 рад.	0.765
MC_YAW_P (FLOAT)	Зміна П-складової «Yaw» Коментар: необхідна кутова швидкість Z в рад/с для помилки 1 рад.	0.744

Контролер орієнтації набагато простіше налаштувати. Фактично, більшу частину значень можна лишити за замовчуванням.

Щоб налаштувати регулятор положення, необхідно перейти в стабілізований режим і поступово збільшувати коефіцієнт П. Якщо помітні коливання або викиди, посилення занадто велике.

Наступні параметри також можуть бути скориговані. Вони визначають максимальні швидкості обертання навколо всіх трьох осей:

- Максимальна «Roll» (MC_ROLLRATE_MAX);
- Максимальна «Pitch» (MC_PITCHRATE_MAX);
- Максимальна «Yaw» (MC_YAWRATE_MAX).

Таблиця 4.3.

П-параметри регулятора положення		
Назва	Опис	Налаштоване значення
MC_ROLLRATE_MAX (FLOAT)	Макс. «Roll» значення	850
MC_PITCHRATE_MAX (FLOAT)	Макс. «Pitch» значення	850
MC_YAWRATE_MAX (FLOAT)	Макс. «Yaw» значення	850

Для налаштування за допомогою функції AutoTune переходимо у вкладку Config Tuning, обираємо пункт Extended Tuning. У випадаючому списку Ch7 Opt обираємо параметр A.utoTune (рис. 4.22).

Для виконання функції AutoTune необхідно підняти квадрокоптер у повітря в безвітряному або мало вітряному просторі у режимі AltHold. Увімкнути перемикач, що прив'язаний до сьомого каналу RC приймача.

Після чого почнеться процес автотюну, тривалістю 12-15 хвилин. По його завершенню прозвучить спеціальний сигнал, після чого необхідно приземлити квадрокоптер. Даний процес можна повторювати кілька разів, якщо результат виконання автотюну нас не влаштовує.

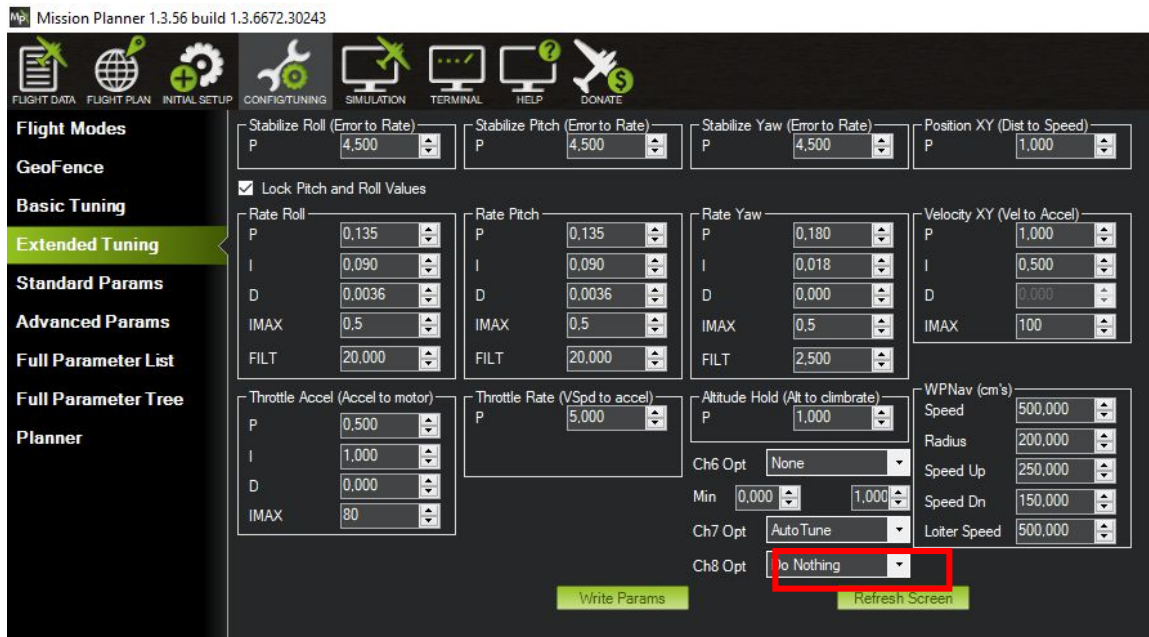


Рис. 4.22. Вікно Extended Tuning та прив'язка функції AutoTune до 7го каналу

Для налаштування за допомогою функції SaveTrim переходимо у вкладку Config Tuning, обираємо пункт Extended Tuning та, у випадяючому списку Ch7 Opt, обираємо параметр SaveTrim (рис. 4.23).

Для виконання функції SaveTrim необхідно знову підняти квадрокоптер у повітря в безвітряному або мало вітряному просторі у режимі Stabilize. Потім, за допомогою кнопок корекції зміщення на пульті керування (4.24) корегуємо крен квадрокоптера, зміщуючи їх в протилежний бік. Це робиться до тих пір, поки літальний апарат зможе стабільно зависати у повітрі.



Рис. 4.23. Вікно Extended Tuning та прив'язка функції SaveTrim до 7го каналу



Рис. 4.24. Кнопки корегування зміщення на пульті керування

Після чого садимо квадрокоптер на землю, блокуємо запуск (важіль тяги в нижній лівий кут) та вмикаємо перемикач, що прив'язаний до сьомого каналу RC приймача та повертаємо значення кнопок кореляції зміщення у початкові позиції.

Даний процес також можна повторювати кілька разів, якщо результат виконання корегування нас не влаштовує.

5. АПАРАТНА ТА ПРОГРАМНА РОЗРОБКА БЛОКУ ВИЯВЛЕННЯ ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ

5.1. Датчики системи газоаналізу

Після ретельного огляду всіх характерних рис, принципів вимірювання, переваг та недоліків було прийняте рішення, щодо використання датчиків напівпровідникового типу. Вони задовольняють всім необхідним вимогам для встановлення на міні БПЛА, а саме: доступні у купівлі, мало піддаються зовнішнім впливам і мають можливість працювати у потоці газу, що безперечно виділяє їх з поміж інших типів газових сенсорів.

Враховуючи те, що датчики газу мають бути сумісними з платою розробника Arduino YUN, що використовується як плата керування, в складі системи газоаналізу на платформі міні безпілотного літального апарату були обрані напівпровідникові датчики серії MQ, а саме - MQ-5, MQ-7 та MQ-9 (рис. 5.1).



Рис 5.1. Датчики MQ-5, MQ-7 та MQ-9

Принцип роботи всіх обраних датчиків заснований на зміні опору тонкоплівкового шару діоксиду олова (SnO_2) при контакті з молекулами газу, що визначається. Чутливий елемент датчиків складається з керамічної трубки з покриттям Al_2O_3 і нанесеного на неї чутливого шару діоксиду олова. Всередині трубки проходить нагрівальний елемент, який нагріває чутливий шар до температури, при якій він починає реагувати на визначений газ. Чутливість до різних газів досягається варіюванням складу домішок в чутливому шарі.

Для правильної роботи сенсорів нагрівальний елемент необхідно поперемінно живити від 1,5 В (90 секунд), потім від 5 В (60 секунд). Або змінювати напругу по синусоїді з відповідною амплітудою і площею ПІД-графіка. У період живлення від низької напруги досягається максимум чутливості чадного газу, а в період високої напруги відбувається фіксування вуглеводневих газів і випаровування конденсату.

Для отримання стабільних показань новий сенсор необхідно один раз прогріти (залишити включеним) протягом 48 годин. Після цього стабілізація, після включення, буде займати близько хвилини.

Показання сенсорів піддаються впливу температури і вологості навколишнього повітря. Тому, в разі використання датчика газу в мінливому середовищі, при необхідності отримання точних показань, знадобиться реалізувати компенсацію цих параметрів.

Короткі технічні характеристики обраних датчиків

Технічні дані датчика газу MQ-5.

Особливості:

- Висока чутливість до метану, зріджених нафтових газів
- Висока працездатність і низька вартість
- Проста схема підключення

Специфікації:

Таблиця 5.1

Стандартний стан роботи

Символ	Назва параметру	Значення параметру	Нотатки
Vc	Вхідна напруга	5V±0.1	Пост. / зм. струм
VH (H)	Напруга нагріву (висока)	5V±0.1	Пост. / зм. струм
VH (L)	Напруга нагріву (низька)	1.4V±0.1	Пост. / зм. струм
RL	Опір навантаження	20к Ω	
RH	Опір нагрівання	31Ω±10%	Кімнатна температура
PH	Споживання тепла	Менше 800мВ	

Таблиця 5.2

Характеристики навколишнього середовища

Символ	Назва параметру	Значення параметру	Нотатки
T _{ao}	Температура використання	-10°C - 50°C	
T _{as}	Температура зберігання	-20°C - 70°C	
RH	Відносна вологість	Менше 95%RH	
O ₂	Концентрація кисню	21% концентрація може впливати на чутливість	Мін. значення - більше 2%

Таблиця 5.3

Характеристики чутливості

Символ	Назва параметру	Значення параметру	Нотатки
R _s	Поверхневий опір чутливого елемента	10-60кΩ	В 5000 ppm Метану
α (300/100ppm)	Коефіцієнт нахилу концентрації	Менше 0.6	R _s (300ppm)/R _s (100ppm)
Стандартні робочі умови	Температура -20 °C ± 2 °C; відносна вологість 65% ± 5%; RL: 20кΩ ± 5%		
	V _c :5V±0.1V; V _H :5V±0.1V;		
Час попереднього нагріву	Не менше 24 годин	Діапазон виявлення: 200ppm-10000ppm ЗНГ, метану, ізобутану, пропану.	

Технічні дані датчика газу MQ-7.

Особливості:

- Висока чутливість до окису вуглецю
- Висока працездатність і низька вартість
- Проста схема підключення

Специфікації:

Таблиця 5.4

Стандартний стан роботи

Символ	Назва параметру	Значення параметру	Нотатки
Vc	Вхідна напруга	5V±0.1	Пост. / зм. струм
VH (H)	Напруга нагріву (висока)	5V±0.1	Пост. / зм. струм
VH (L)	Напруга нагріву (низька)	1.4V±0.1	Пост. / зм. струм
RL	Опір навантаження	10 к Ω	Можна налаштувати
RH	Опір нагрівання	33Ω±5%	Кімнатна темп.
TH (H)	Час нагрівання (високий)	60±1 секунд	
TH (L)	Час нагрівання (низький)	90±1 секунд	
PH	Споживання тепла	Близько 350мВ	

Таблиця 5.5

Характеристики навколишнього середовища.

Символ	Назва параметру	Значення параметру	Нотатки
Ta0	Температура використання	-20°C -50°C	
Tas	Температура зберігання	-20°C -50°C	
RH	Відносна вологість	Менше 95%RH	
O2	Концентрація кисню	21%	Мін. Знач. більше 2%

Таблиця 5.6

Характеристики чутливості

Символ	Назва параметру	Значення параметру	Нотатки
R_s	Поверхневий опір чутливого елемента	2-20к Ω	У 100ppm окису вуглецю
α (300/100ppm)	Коефіцієнт нахилу концентрації	Менше 0.5	$R_s(300ppm)/R_s(100ppm)$
Стандартні робочі умови	Температура $-20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$; відносна вологість $65\% \pm 5\%$; RL: 10к $\Omega \pm 5\%$		
	$V_c: 5V \pm 0.1V$; $V_H: 5V \pm 0.1V$; $V_H: 1.4V \pm 0.1V$		
Час попереднього нагріву	Не менше 48 годин	Діапазон виявлення: 20ppm-2000ppm окису вуглецю	

Технічні дані датчика газу MQ-9.

Особливості:

- Висока чутливість до метану, пропану та CO
- Висока працездатність і низька вартість
- Проста схема підключення

Специфікації:

Таблиця 5.7

Стандартний стан роботи

Символ	Назва параметру	Значення параметру	Нотатки
V_c	Вхідна напруга	$5V \pm 0.1$	Пост. / зм. струм
V_H (H)	Напруга нагріву (висока)	$5V \pm 0.1$	Пост. / зм. струм

Продовження табл. 5.7

Символ	Назва параметру	Значення параметру	Нотатки
VH (L)	Напруга нагріву (низька)	1.4V±0.1	Пост. / зм. струм
RL	Опір навантаження		Можна налаштувати
RH	Опір нагрівання	33Ω±5%	Кімнатна температура
TH (H)	Час нагрівання (високий)	60±1 секунд	
TH (L)	Час нагрівання (низький)	90±1 секунд	
RH	Споживання тепла	Близько 340мВ	

Таблиця 5.8

Характеристики навколишнього середовища

Символ	Назва параметру	Значення параметру	Нотатки
Tao	Температура використання	-20°C -50°C	
RH	Відносна вологість	Менше 95%RH	
O2	Концентрація кисню	21% концентрація може впливати на чутливість	Мінімальне значення - більше 2%

Характеристики чутливості

Символ	Назва параметру	Значення параметру	Нотатки
R_s	Поверхневий опір чутливого елемента	2-20к Ω	У 100ppm окису вуглецю
α (300/100ppm)	Коефіцієнт нахилу концентрації	Менше 0.5	$R_s(300ppm)/R_s(100ppm)$
Стандартні робочі умови	Температура $-20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$; відносна вологість $65\% \pm 5\%$; RL: 10к $\Omega \pm 5\%$		
	$V_c: 5V \pm 0.1V$; $V_H: 5V \pm 0.1V$; $V_L: 1.4V \pm 0.1V$		
Час попереднього нагріву	Не менше 48 годин	Діапазон виявлення: 20ppm-2000ppm окису вуглецю 500ppm-10000ppm CH ₄	

5.2. Підключення датчиків до плати Arduino та їх програмування

Датчик MQ-5 має шість виходів (рис. 5.2): А – виходи керування нагрівачами; В – виходи, з яких зчитуються дані про газ; Н – виходи живлення нагрівачів.

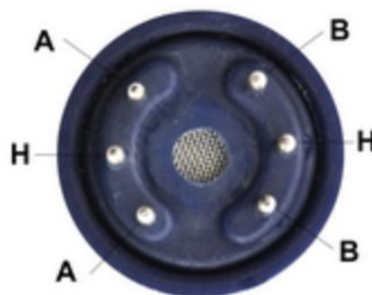


Рис. 5.2. Піни датчика MQ-5

Так як для правильної роботи сенсорів нагрівальний елемент необхідно попеременно живити від 1,5 В (90 секунд), потім від 5 В (60 секунд), було розроблено електричну принципову схему підключення датчика MQ-5 (рис. 5.3).

При підключенні сенсора до мікроконтролера, різну напругу нагрівача можна симулювати за допомогою ШІМ-сигналу. Однак, підключення живлення сенсора безпосередньо до піну неможливо через те, що він споживає великий струм (150 мА). Тому управління живленням необхідно здійснювати через транзистор. Проаналізувавши необхідні умови, було прийняте рішення використовувати польовий транзистор MOSFET IRF530N (рис. 5.3).

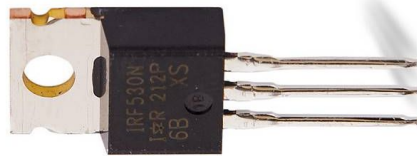


Рис. 5.3. Польовий MOSFET транзистор IRF530 з N-каналом

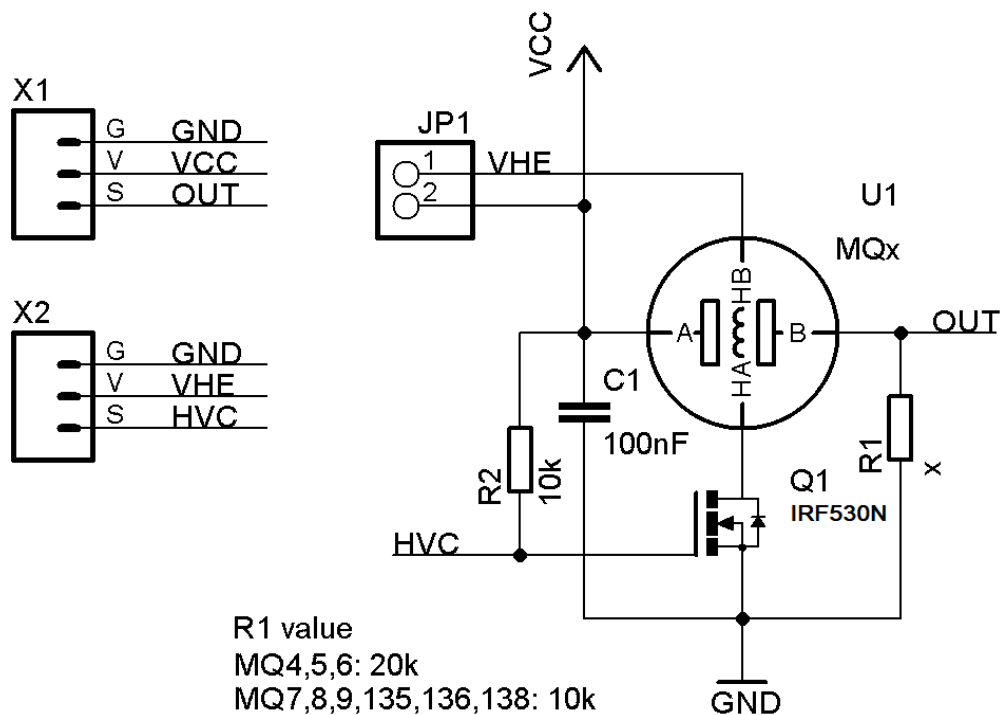


Рис. 5.4. Електрична принципова схема підключення датчиків до плати Arduino

На схемі показано, як, за допомогою транзистора, відбувається керування подачі напруги. HVC (13-й цифровий пін Arduino) видає сигнал на затвор транзистора, цим самим відкриває потік струму; затвор заземлюється, щоб заблокувати струм.

Згідно таблиці 5.1, опір навантаження R1 має бути не менше 20кΩ. Вихід V_{HE} підключається до джерела постійного струму з напругою 5В, а вихід VCC – до піна 5В плати Arduino. Вихід OUT під'єднується до аналогового виходу A0 на платі, так як саме з нього ми будемо зчитувати дані про газ.

Датчик MQ-9 буде підключений напряму до плати Arduino так, як вже має всі необхідні компоненти для підключення (рис. 5.5).

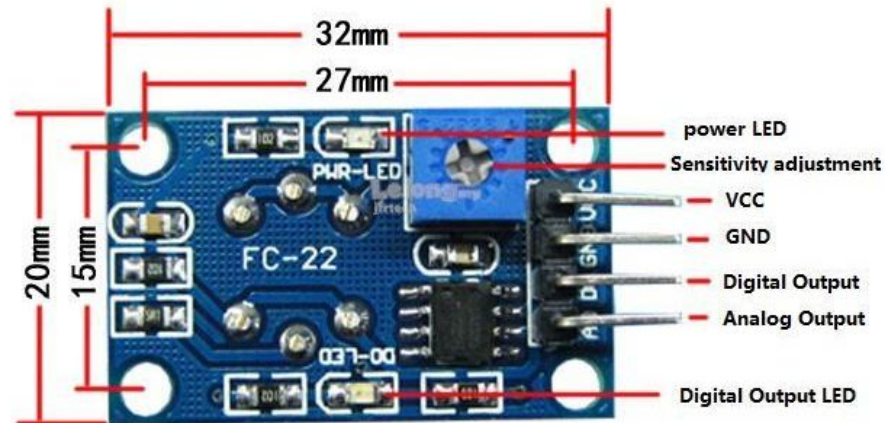


Рис. 5.5. Піни датчика MQ-9

Пін D0 під'єднується до аналогового виходу A0, а виходи VCC та GND до 5В та заземлення відповідно.

5.3. Обробка даних з датчиків MQ-5 та MQ-9

Для зняття показів з датчика MQ-5 було використано бібліотеку <ТройкаMQ.h>, що розроблена спеціально для датчиків з MQ-2 по MQ-135. Запускає циклічні зміни нагріву, які потрібні моделям на зразок MQ-7 і MQ-9. Перетворює аналоговий вихідний сигнал датчика в PPM (анг. parts per million – частинки на мільйон), що зручно у процесі вимірювання.

Також дана бібліотека проводить калібровку на основі заздалегідь визначених параметрів та проведених вимірювань, що подаються в файлах бібліотеки і зображені на рисунку 5.6, 5.7 та в таблицях 5.10, 5.11.



Рис. 5.6. Графік відношення вхідного значення PPM до вхідного відношення Rs/Ro датчика MQ-5

Таблиця 5.10

Дані для побудови графіка відношення вхідного значення PPM до вхідного відношення Rs/Ro датчика MQ-5

Вхідне PPM	Вхідне Rs/Ro
5,29831737	-0,0833816
6,2146081	-0,3856625
6,68461173	-0,597837
6,90775528	-0,6931472
7,60090246	-0,9162907
8,00636757	-1,0498221
8,51719319	-1,2729657
9,21034037	-1,6094379

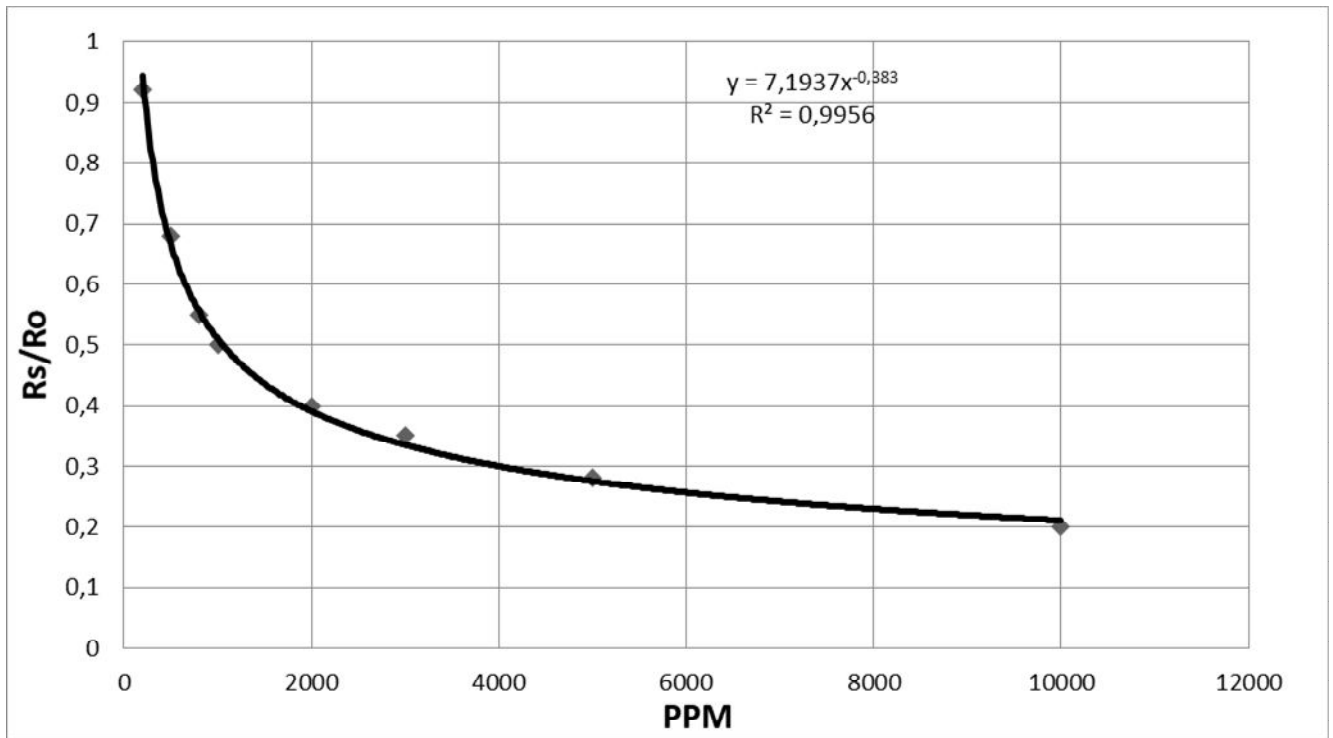


Рис. 5.7. Графік відношення теоретичного значення PPM до розрахованого відношення Rs/Ro датчика MQ-5

Таблиця 5.11

Теоретичні значення PPM до розрахованого відношення Rs/Ro

PPM	Rs/Ro
200	0,92
500	0,68
800	0,55
1000	0,5
2000	0,4
3000	0,35
5000	0,28
10000	0,2

Розроблено програмний код у програмі Arduino IDE для зняття показів з датчика MQ-5, на виході отримуємо концентрацію метану у PPM.

Для обраного датчика MQ-9 немає можливості використати таку ж схему підключення як для MQ-5, тому в даному випадку реалізується просте

зчитування даних і перетворення їх значення в напругу. Розроблено програмний код у програмі Arduino IDE для зняття показів з датчика MQ-9.

5.4. Розробка корпусу блоку газоаналізу та аналіз його розміщення на корпусі міні БПЛА

Враховуючи те, що зона реагування на газ напівпровідникових датчиків знаходиться безпосередньо біля відділу із реагентом, є необхідність розробки спеціальної трубки, що подаватиме повітря безпосередньо на датчик за допомогою кулера. Система вимірювання, що складається з плати Arduino YUN та плати підключення живлення, буде міститись під цією трубкою у спеціальному відсіку.

В програмному середовищі КОМПАС-3D v17 була розроблена об'ємна модель корпусу (рис. 5.8) з урахуванням усіх необхідних розмірів:

- діаметр отвору для датчика 19.5 мм;
- розміри трубки 30мм x 30мм x 110мм;
- розміри відділення для плат 50 мм x 85мм x 110 мм;
- загальна висота корпусу 80 мм;
- орієнтована вага (розрахована програмою для друку) – 102 гр.

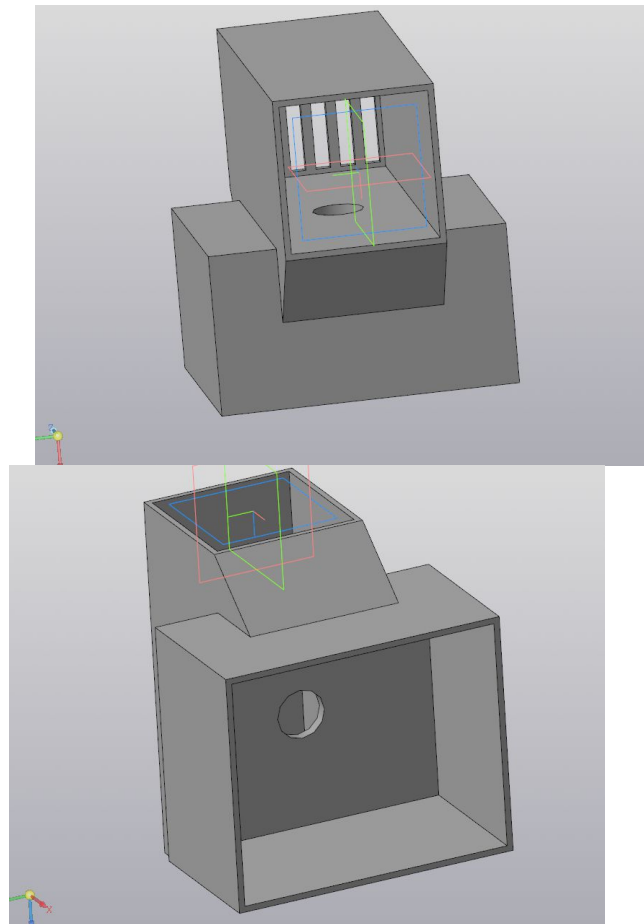


Рис. 5.8. Об'ємна модель корпусу блоку газоаналізу

Враховуючи цільове призначення літальної платформи, для її безпечного використання, було розроблено та виготовлено захисний елемент для захисту гвинтів у випадку зіткнення. Відповідно до цього, було проведено моделювання у САПР SolidWorks за допомогою модуля «Моделювання», та визначено оптимальну геометрію захисту. Численні статичні навантаження були застосовані до захисного елемента у різних сценаріях зіткнення. Фактична прикладена сила була до 4 Н, швидкість квадрокоптера була 2 м/с, а його маса 1.5 кг. Подальше моделювання впливу різних факторів польоту дозволило отримати наступну геометрію захисного елемента, що зображено на рис. 5.9.

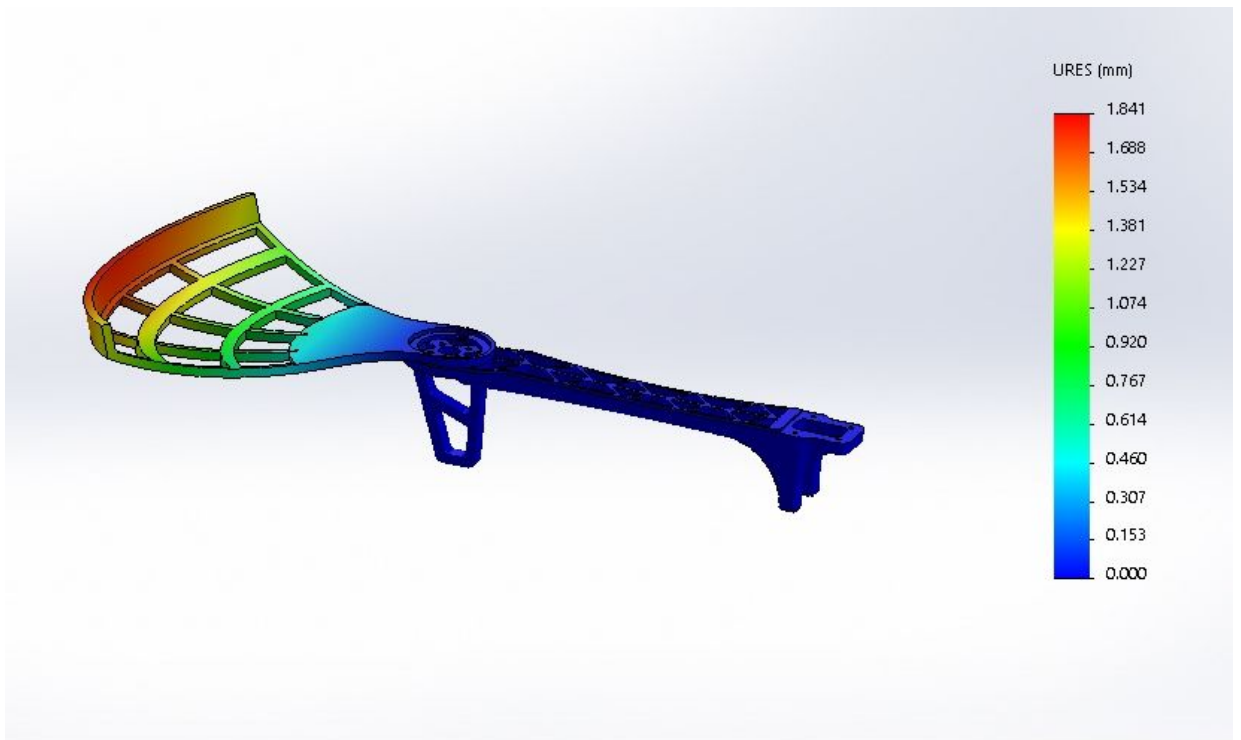


Рис. 5.9. Результат моделювання прикладеного статичного навантаження 4 Н до квадрокоптера зі швидкістю руху 2 м/с

Результати моделювання показали, що захисний елемент без деформації може протистояти легким зіткненням з жорсткими перешкодами і захищати гвинти та каркас БПЛА від механічних пошкоджень. Після закінчення проектування захисного елемента, було створено модель зі встановленими захисними елементами (рис. 5.10) для визначення зон з найменшою кількістю збурень від гвинтів та визначення найкращого місця розміщення газоаналізатора.



Рис. 5.10. Повномасштабна 3d модель квадрокоптера з встановленим захисним елементом

Моделювання потоків повітря створюваних пропелерами квадрокоптера (рис. 5.11) у програмному продукті SolidWorks 2019.

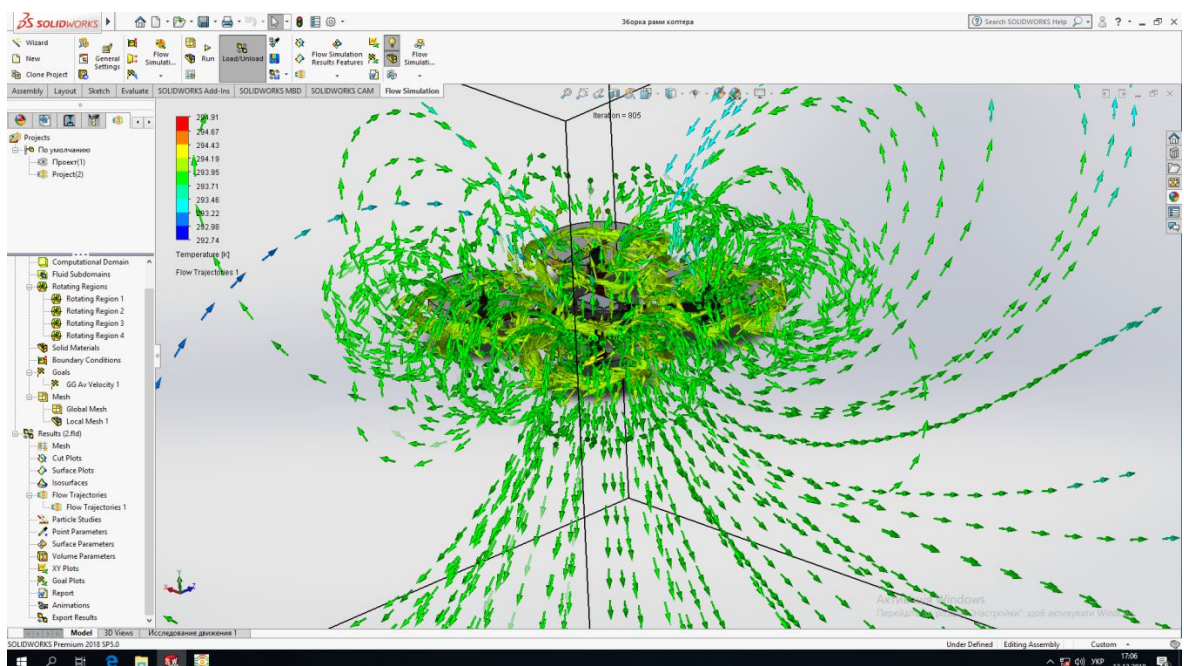


Рис. 5.11. Моделювання потоків повітря, створюваних пропелерами міні БПЛА

В наукових статтях на тему розміщення датчиків газу на корпусі квадрокоптера пропонується три основні варіанти:

1. По центру під дном БПЛА (Рис. 5.12);



Рис. 5.12. Приклад розміщення датчиків під дном БПЛА

2. По центру над квадрокоптером (Рис. 5.13);



Рис. 5.13. Приклад розміщення датчиків над променями дрона

3. Винесені за межі корпусу на спеціальних опорах (Рис. 5.14).



Рис. 5.14. Приклад розміщення датчиків, винесених за межі корпусу на спеціальних опорах

Було розглянуто три схеми розміщення газоаналізатора: 1. Центровано під дном БПЛА (рис. 5.12); 2. Центровано над БПЛА (рис. 5.13); 3. Поза рамою БПЛА (рис. 5.14) на спеціальній опорі (довжина опори становила 0.35 м). Усі моделювання проводилися з наступними параметрами: розміри БПЛА 0:45 x 0:45 м, гвинти 10x45, швидкість їх обертання 5000 об/хв, розміри аеродинамічної труби 8 x 16 x 8 м (ширина-глибина-висота відповідно), тиск 101325 Па, температура 293.2 К, інтенсивність турбулентності 0.4 %, а її довжина 4.8×10^{-4} м, число ітерацій 2000. Під час моделювань були розглянуті середні швидкості, що протікають навколо газоаналізатора.

Результати моделювання для всіх схем зображені на рис. 5.15. Як видно, максимальні швидкості руху повітря знаходяться в межах гвинтів і зменшуються в центрі та зовні БПЛА. Таким чином, схеми 1 і 2, в середньому, мають однаковий вплив швидкості руху повітря на газоаналізатор. А середні швидкості, що протікають навколо газоаналізатора у третій схемі, менші, порівняно з двома іншими схемами.

Подальше моделювання було спрямоване на дослідження впливу турбулентності. Ці результати представлені на рис. 5.16. Аналіз показав, що повітряний потік рухається від центрів ротора в сторони відносно квадрокоптера, створюючи зони з найбільшою турбулентністю в області обертання гвинтів. Досить малий вплив турбулентності був на першій схемі. Але найменший вплив турбулентності на газоаналізатор був для схеми 3.

Таким чином, загальне порівняння запропонованих схем показало, що найбільш доцільною для подальших досліджень є схема 3, де газоаналізатор розміщується поза рамою БПЛА.

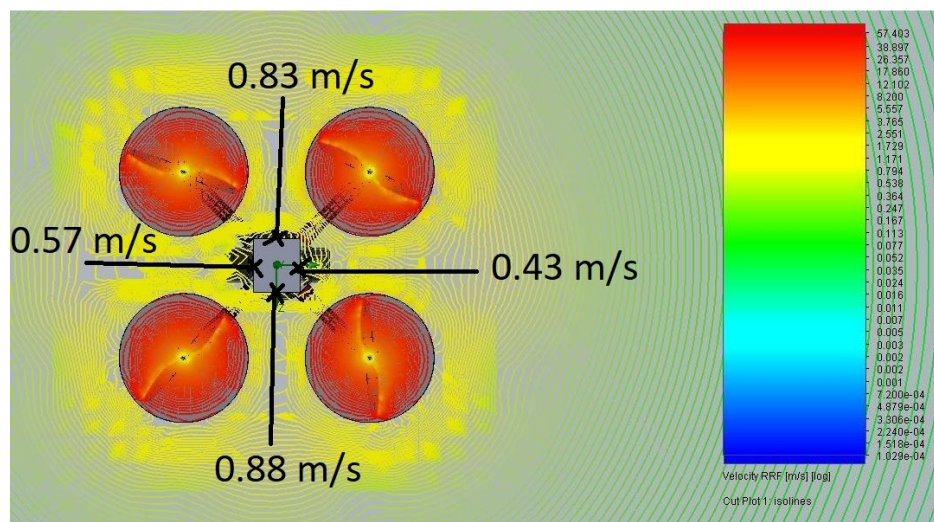
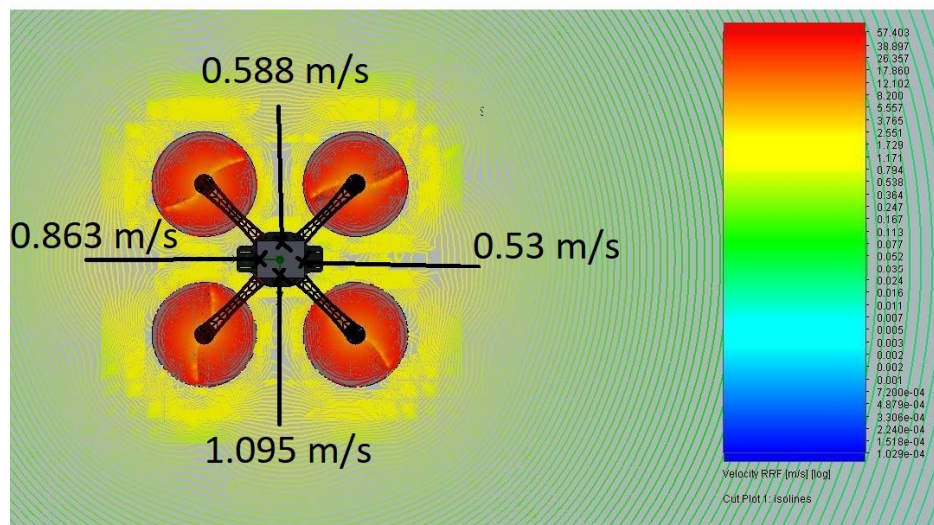
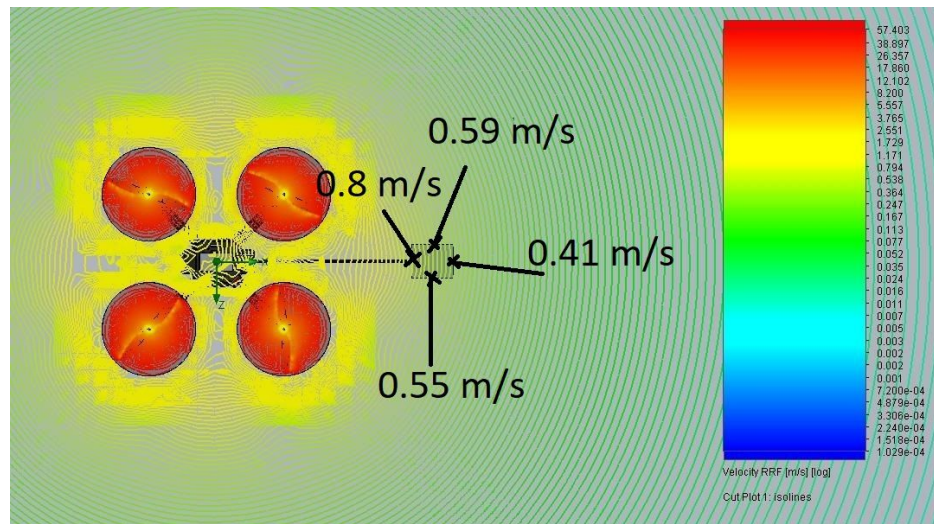


Рис. 5.15. Розподіл швидкостей навколо квадрокоптера. Зображення зверху відповідає схемі 1, середнє - схемі 2, а нижнє - схемі 3. Середні значення швидкості потоку (в м/с) навколо газоаналізатора показані для його чотирьох сторін (вигляд зверху).

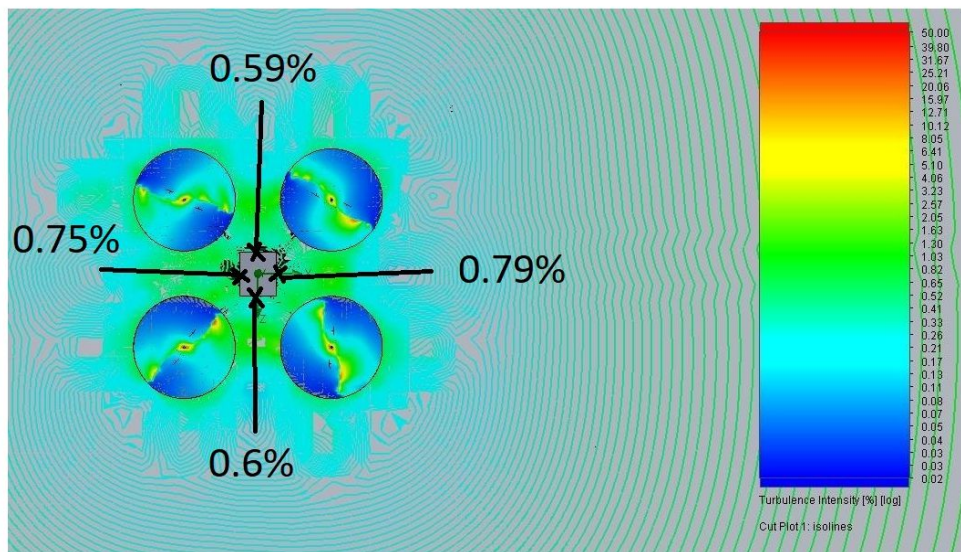
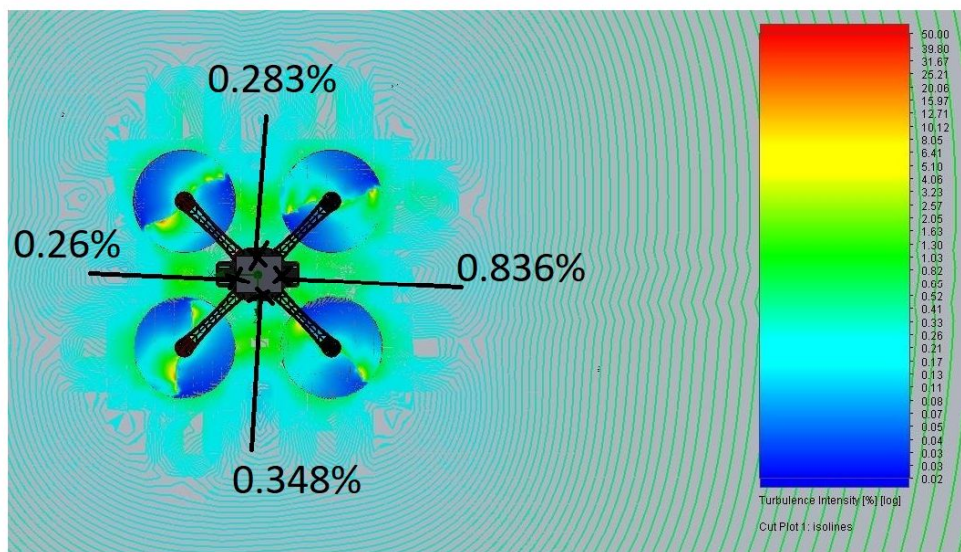
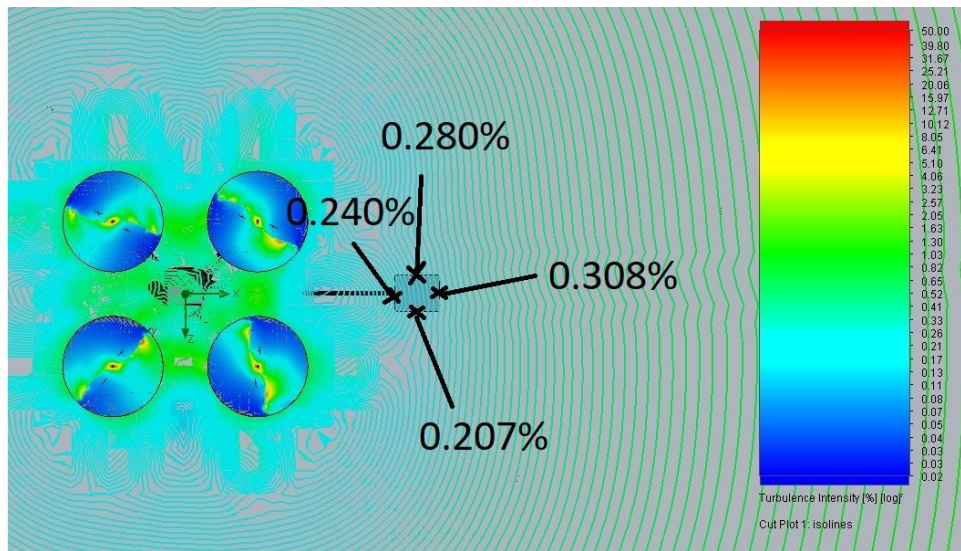


Рис. 5.16. Турбулентності навколо квадрокоптера. Зображення зверху відповідає схемі 1, середнє - схемі 2, а нижнє - схемі 3. Значення

турбулентності (у %) навколо газоаналізатора показані для його чотирьох сторін (вигляд зверху).

5.5. ROS та інші програмні компоненти

Robot Operating System (ROS) є потужним програмним забезпеченням для керування роботами.

В даний час він активно використовується в численних дослідницьких проектах, оскільки це модульна система з відкритим кодом, яка підтримує різні мови програмування та надає потужні інструменти візуалізації [145].

5.5.1. Вимірювальна плата

Arduino Yún mini (рис. 5.17) – це розробницька плата, побудована на базі об'єднання мікроконтролера ATmega32u4 та мікропроцесору Atheros AR9331. Atheros мікропроцесор зробив можливим запуск Linux дистрибутиву OpenWrt, що називається Linino OS. Дана розробницька плата оснащена мережевими інтерфейсами Ethernet та Wi-Fi, USB-A портом, micro-SD картковим слотом, 20 цифровими входами та виходами (7 з яких мають підтримку ШИМ і 12 можуть бути задіяні як аналогові входи), 16 MHz кварцовим резонатором, micro USB роз'ємом, підтримкою ICSP.

Основною причиною використання саме цієї плати є можливість забезпечення мережевого підключення через Wi-Fi. Для цієї плати було написано спеціальне програмне забезпечення для підтримки протоколу передачі даних TCP/IP. Підтримка клієнта TCP/IP дозволяє підключатися до віддалених хостів або апаратних засобів для читання і запису даних. У поточному проекті TCP/IP протокол використовується для передачі даних підключених датчиків до інших (наземних) компонентів системи.

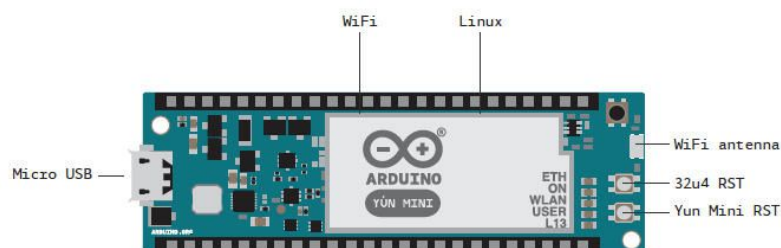


Рис. 5.17. Arduino Yun mini

5.5.2. Запис польотної інформації

У процесі створення газової карти можна записати дані польотної інформації та вимірювання газу.

Програмний додаток для газової мапи має можливість зберегти всі важливі дані в спеціальному файлі GeoJSON [146]. На рис. 5.18 продемонстрований фрагмент файлу GeoJSON, який відповідає за збереження даних про одну точку на мапі газу. Геометричний масив включає x, y, z декартові координати мБПЛА. Також до масиву координат включено географічну довготу і широту (це необхідно для візуалізації газових точок на мапі). `Marker_color` у масиві властивостей містить 4 числа у форматі шістнадцяткового об'єднання, по 2 символи на число (для прикладу: ff або 8A), в одному рядку, і це описує колір RGBA, який формується відповідно до значень вимірювань підключених датчиків.

```

1  {
2  ... "features": [
3  ..... {
4  .....   "geometry": {
5  .....     "cartesian": [
6  .....       -1.5155193748599999e-07,
7  .....       7.0366422502800001e-07,
8  .....       0
9  .....     ],
10 .....     "coordinates": [
11 .....       15.071830000006329,
12 .....       50.772733999998628
13 .....     ],
14 .....     "type": "Point"
15 .....   },
16 .....   "properties": {
17 .....     "marker_color": "#02ff00ff",
18 .....     "marker_size": "small",
19 .....     "marker_symbol": 1
20 .....   },
21 .....   "time": "1513859270",
22 .....   "type": "Feature"
23 ..... },

```

Рис. 5.18. Фрагмент GeoJSON файлу, відповідальний за збереження даних однієї точки на “мапі газу”

Для запису даних польоту використовувалася команда, подібна до цієї:

```
rosvbag record -O ~/bagfiles/flight1.bag /ardrone/odometry
/ardrone/image_raw,
```

де `rosvbag` – назва пакета ROS для запису і відтворення попередньо записаних даних;

`record` – перший параметр для цієї команди. Це означає, що тепер інформація записується;

аргумент `-O` наказує `rosvbag` записувати журнал у файл з ім'ям `flight1.bag`, з розташуванням у каталозі `~/bagfile`, а службові аргументи дають команду на запис `rosvbag` тільки підписки на ці дві теми (`/ardrone/odometry` та `/ardrone/image_raw`);

`/ardrone/odometry` – ROS служба, що містить дані одометрії;

`/ardrone/image_raw` – містить відео з камер мБПЛА.

Запуск цієї команди виконує конвертацію `flight1.bag` до вигляду звичайного `.txt` файлу логів з одометричною інформацією:

```
rostopic echo -b ~/bagfiles/flight1.bag -p /ardrone/odometry > data.txt
```

Звичайно, ця команда може бути модифікована для виокремлення відео з `flight1.bag` і його наступного перетворення в формат звичайного відеофайлу.

Після отримання файлу `.bag` і файлу даних газу, а також перетворення файлу `.bag` в файл `odometry.txt` (рис. 5.19) можна побудувати карту газу.

```
data_odometry.txt x
1495214923063882240, 15720, 1495214923042403001, odom, ardrone_base_link, 0.414717076996, 1.170029922, 0.591, 0.00248530994931, 0.00247691308917, -0.22:
149521492306388726, 15721, 1495214923047269745, odom, ardrone_base_link, 0.415047846734, 1.17030665265, 0.591, 0.00234435760323, 0.00231535345948, -0.2:
1495214923063875253, 15722, 1495214923050961348, odom, ardrone_base_link, 0.415269930813, 1.170528976, 0.591, 0.00227458524009, 0.00220588614859, -0.225:
1495214923063892240, 15723, 1495214923057630071, odom, ardrone_base_link, 0.41562573301, 1.17094926816, 0.591, 0.00228827488624, 0.00249841690862, -0.22:
1495214923063897564, 15724, 1495214923062308670, odom, ardrone_base_link, 0.415846125514, 1.1712578055, 0.592, 0.00222163659145, 0.00232562727436, -0.22:
1495214923103861790, 15725, 1495214923067171892, odom, ardrone_base_link, 0.416047673875, 1.17159098625, 0.592, 0.0021531043663, 0.00237721756652, -0.22:
1495214923103877901, 15726, 1495214923074398734, odom, ardrone_base_link, 0.416348015629, 1.17208374836, 0.592, 0.00211047499817, 0.00250362466219, -0.2:
1495214923103964051, 15727, 1495214923075560565, odom, ardrone_base_link, 0.416396702152, 1.17216291322, 0.592, 0.00202043125066, 0.00269455035645, -0.2:
1495214923103972812, 15728, 1495214923082327102, odom, ardrone_base_link, 0.416683185291, 1.17262243779, 0.592, 0.00187405799754, 0.0024864399359, -0.22:
1495214923103981567, 15729, 1495214923090776008, odom, ardrone_base_link, 0.41706586946, 1.17324102103, 0.592, 0.00199241635239, 0.00272785255809, -0.22:
1495214923103988254, 15730, 1495214923090837131, odom, ardrone_base_link, 0.417068809223, 1.17324578033, 0.592, 0.00194501269652, 0.00290888918377, -0.2:
1495214923103993824, 15731, 1495214923096251929, odom, ardrone_base_link, 0.417343880172, 1.17369106485, 0.592, 0.00194488817452, 0.0024430602817, -0.22:
1495214923104000107, 15732, 1495214923100686304, odom, ardrone_base_link, 0.417578884304, 1.17406277972, 0.589, 0.00193560404342, 0.00248112160797, -0.2:
1495214923143821835, 15733, 1495214923105186136, odom, ardrone_base_link, 0.417826397944, 1.17444559038, 0.589, 0.00199698555208, 0.00297736328466, -0.2:
1495214923143836581, 15734, 1495214923119972041, odom, ardrone_base_link, 0.41866389074, 1.17572007972, 0.589, 0.00169580534496, 0.00229458295188, -0.22:
1495214923143844229, 15735, 1495214923121116227, odom, ardrone_base_link, 0.4187200424, 1.1758138564, 0.589, 0.00155455556853, 0.0026140058991, -0.22551:
```

Рис. 5.19. Файл, що містить дані одометрії після перетворення `bag` файлу

5.5.3. Побудова мапи газу

Загальна схема зв'язку між дроном і наземною станцією описується на рис. 5.20. Плата Arduino підключається до термодатчика датчика, у зв'язку з

неможливістю проведення повноцінних льотних випробувань поблизу місця значного витоку газу датчик вимірювання концентрації газу було замінено на термодатчик, і розміщується на борту МБПЛА.

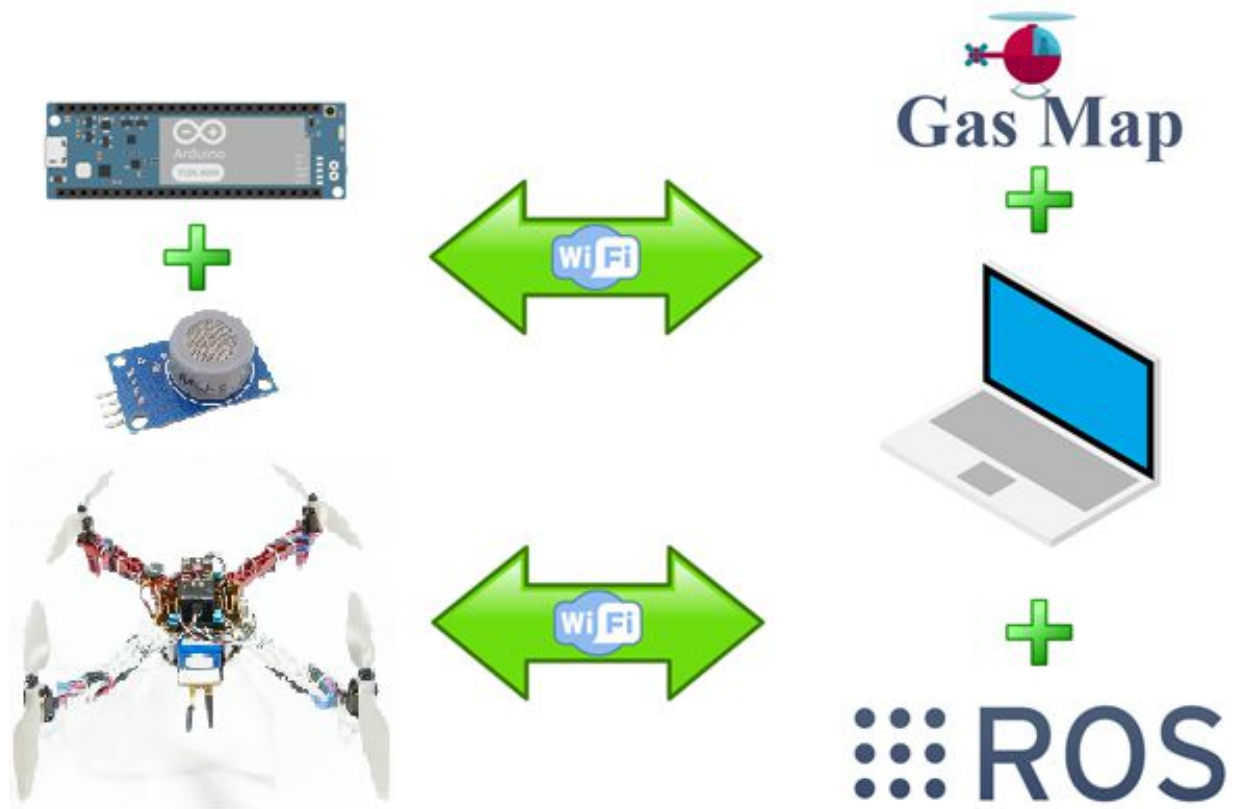


Рис. 5.20. Схема зв'язку між дроном і наземною станцією

Arduino Yún створює власне TCP-з'єднання на порту 255.

Наземний комп'ютер створює точку доступу Wi-Fi. Arduino Yún і МБПЛА підключаються до цієї точки доступу Wi-Fi (рис. 5.21).

Для побудови карти газу використовується спеціальна програма.

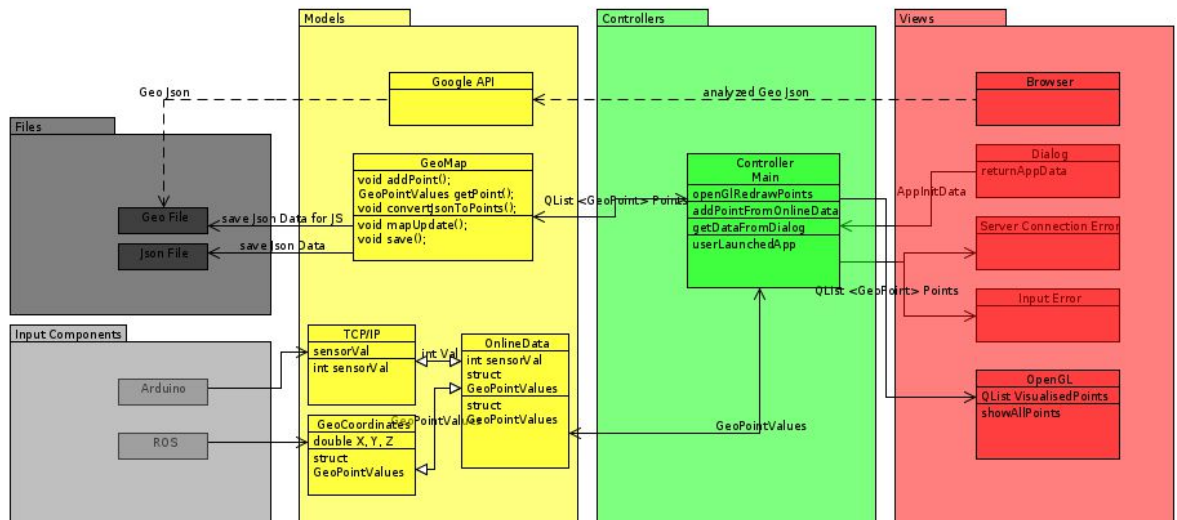


Рис. 5.21. Діаграма програмної реалізації

На рис. 5.21 зображено діаграму програмної реалізації. На цій діаграмі є два сірі блоки. Сірі блоки – це зовнішні компоненти. Блок Files включає 2 файли: Geo File – вміст даного файлу, відправляється до Google Maps API, що дозволяє відобразити поточну позицію квадрокоптеру на Google Maps, Json File – це файл для збереження інформації про поточний стан вимірювань. Створення файлу Json записує поточний політ для подальшого відтворення в автономному режимі. Іншим сірим блоком є вхідні компоненти (Input Components). Вхідними компонентами є Arduino (підключена за допомогою TCP) і ROS (вузли, які надають інформацію про поточне положення квадрокоптера і поточні часові мітки даних).

Поруч із сірими блоками розташовані три кольорові блоки. Ці блоки є реалізацією шаблону програмування MVC. Згідно з цим шаблоном програма повинна складатися з моделей (Models), відображення (Views) і контролерів (Controllers).

Всі класи, що належать до моделі, працюють з даними програми. Клас Google Map включає в себе всі методи, які відповідають за збереження даних про точки вимірювання і операції збереження даних координат польоту в Json File і відновлення хмари точок з цього файлу, в разі запуску програми в автономному режимі. Online data – обгортка для класів TCP/IP і GeoCoordinates. Клас TCP/IP відповідно до свого імені відповідає за з'єднання

по TCP/IP протоколу між платою Arduino Yun та програмою побудови мапи газу, встановленою на ПК наземної станції. Це необхідно для отримання даних датчиків, які підключені до Arduino Yun. Клас GeoCoordinates отримує дані одометрії від ROS і здійснює певні трансформації цих даних (наприклад, перетворення координат декартових в координати географічного розташування). Google API буде описуватися самостійно в складі компонента Browser (View).

Класи відображення (View) надають можливість візуалізувати інформацію, представлену в моделі для користувача, і вони необхідні для зв'язку між користувальницьким інтерфейсом і моделлю. Найбільш важливим з цих класів є клас OpenGL. Клас OpenGL створює Open GL [148] вікно, що візуалізує хмару точок газових вимірів. Клас Dialog надає можливість встановлення параметрів ініціалізації, як онлайн/офлайн режим, мінімальне/максимальне значення датчика (програмний діапазон чутливості підключеного датчика), початкове місце знаходження дрону (поточна система не має GPS-модуля, тому гео-координати – це декартові координати, перетворені в географічні координати) або ім'я файлу без згаданих раніше параметрів у випадку автономного режиму. Помилка підключення до сервера (Server Connection Error) – це вікно з помилкою, яке з'являється у випадку вибору онлайн-режиму без можливості підключення до платформи мБПЛА. Помилка вводу (Input Error) буде показано у випадку помилкових даних у будь-якому полі вікна форми діалогу.

Головний контролер (Main Controller) – це компонент, що забезпечує можливість зв'язку між частинами моделі та відображення.

Google API + Browser відповідають за функціональність карт Google (вона показує точки вимірювання газу на картах Google). Насправді можна інтегрувати браузер в головний додаток як інше вікно QT, але використання незалежного браузера (для запуску JS скрипту) краще, тому що він може працювати на іншому (інших) ПК для відслідковування поточного

розташування БПЛА. Більш того, з міркувань безпечної розробки програмного забезпечення, краще зробити його відокремленим.

Використання MVC паттерну програмування дає можливість легкого масштабування програмного продукту і можливість додавання додаткових функцій без необхідності внесення зміни в раніше написаний код.

В основному, дане програмне забезпечення, написане на мові програмування C++ з використанням QT5 фреймворку, але також включає скрипти запуску bash, скрипт python в частині ROS і скрипт JavaScript для використання API Google Maps (Google не надає C++ API, вони пропонують лише JS API).

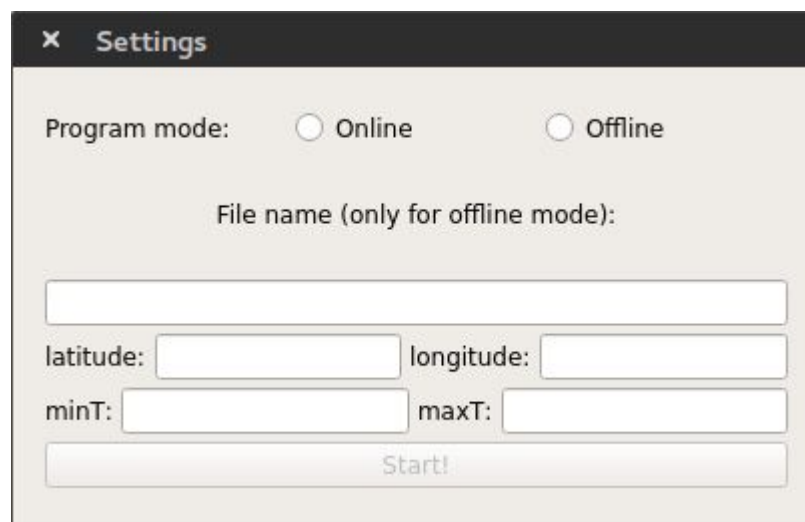


Рис. 5.22 Вікно початкової конфігурації програми

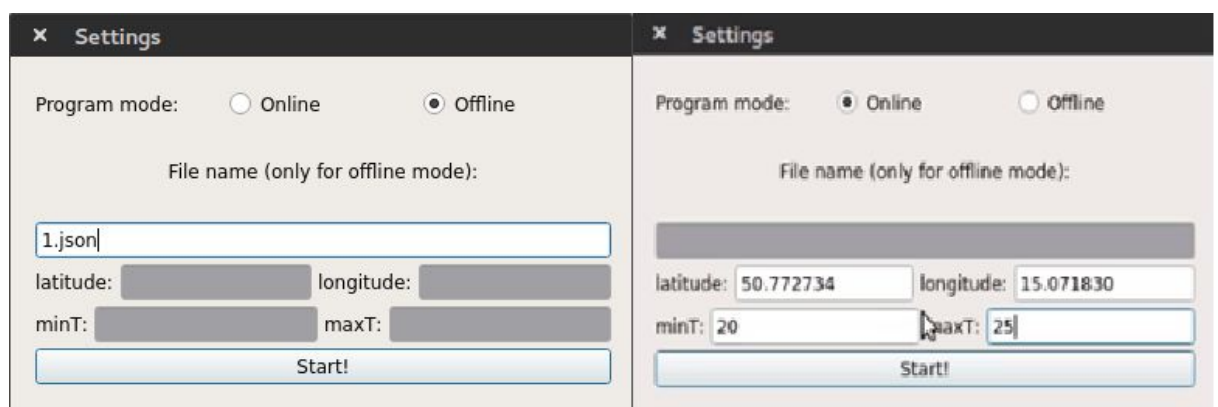


Рис. 5.23 Вікно початкової конфігурації програми в автономному та режимі реального часу

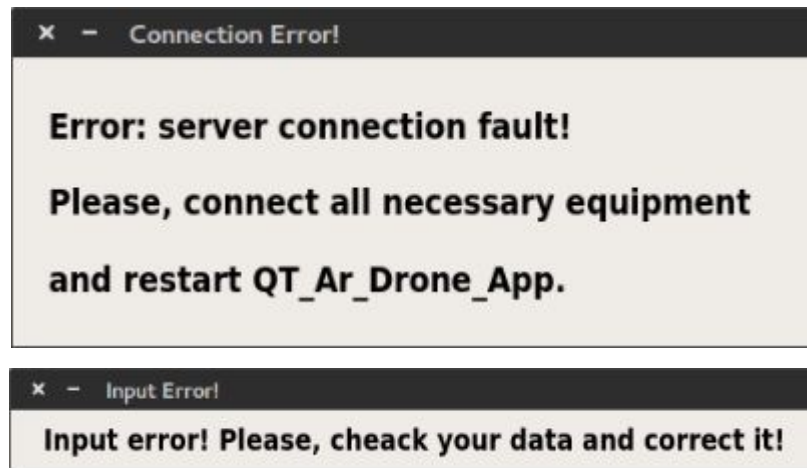


Рис. 5.24 Повідомлення про помилки

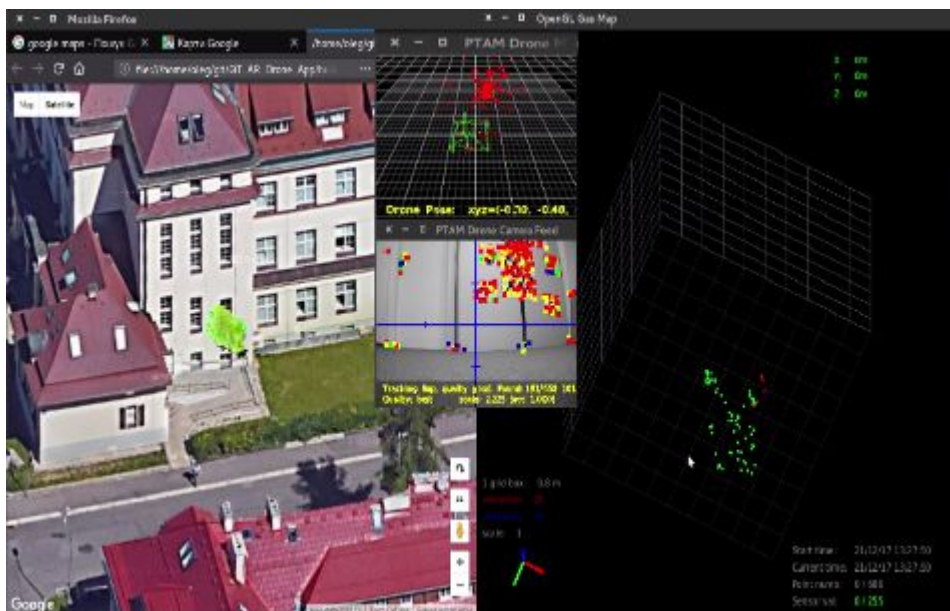


Рис. 5.25. Головне вікно власно розробленої програми для побудови «карти газу» (праворуч), браузер з запущеним JS скриптом, який відображає маршрут проведення вимірів на місцевості (ліворуч), Drone Camera та Drone PTAM вікна з ROS пакунку (в середині)

Перед запуском програми необхідно підключити батарею до мБПЛА і почекати, поки він ввімкнеться. Після цього слід запусити спеціальний bash-скрипт `start_environment_for_ar_drone_app.sh`. Під час виконання цього скрипта він виконує всі необхідні дії для запуску компонентів ROS, необхідних для

нормального виконання програми побудови мапи газу. Користувачу необхідно виконати введення параметрів запуску рис. 5.22.

Дуже важливим під час експлуатації цієї системи є те, що стан батареї контролюється ROS і операційною системою квадрокоптера, тому можливо виникнення аварійної ситуації, при якій відбудеться аварійна посадка в непередбачуваному місці, такому як крона дерева або озеро. Відповідно до поточного етапу проекту подібні ситуації не приймаються до уваги, тому не рекомендується проведення польотів над небезпечними місцями, що є подібними до вищезгаданих.

Програма зображує газові хмари в 3D-просторі. Вона надає можливість обертати попередньо побудовану 3D-сцену, щоб обрати кращу позицію для перегляду газової хмари, для обертання навколо осі потрібно натиснути ліву клавішу мишки і перемістити стрілку на екрані. Це дозволить змінювати напрямок огляду навколо осі X та Z. Перш ніж використовувати цю програму, потрібно налаштувати такі постійні значення, як масштаб карти початкові координати точки запуску (в проекті не використовується GPS, тому географічні координати отримуються математичним шляхом). Щоб переглянути дані однієї з візуалізованих точок, необхідно натискати клавіші "+" або "-" на клавіатурі доти, поки не буде обрана потрібна точка на екрані. Також є рядок стану, який візуалізує кількість точок у відсотках. Рівень газу описується кольором точки. Він змінюється від зеленого до червоного з жовтим у середині відповідно до кількості газу в певний момент часу в діапазоні вимірювань.

Якщо програма використовується в режимі реального часу, допоміжні компоненти будуть запуснені автоматичним скриптом. Основною відмінністю між програмами є інший алгоритм отримання даних. В режимі реального часу програма повинна підключитися через wi-fi до квадрокоптеру. У режимі offline програма відновить одну з попередніх сесій, що була автоматично збережена під час одного з раніше проведених експериментів.

Стабільність роботи в режимі реального часу забезпечується перевіркою якості даних газу та урахуванням лише реальних даних. Також використання протоколу TCP/IP гарантує відповідність отриманих даних реальним вимірам навіть у місцях з низьким рівнем сигналу WiFi.

Загальний алгоритм роботи системи наведено на рис. 5.26.

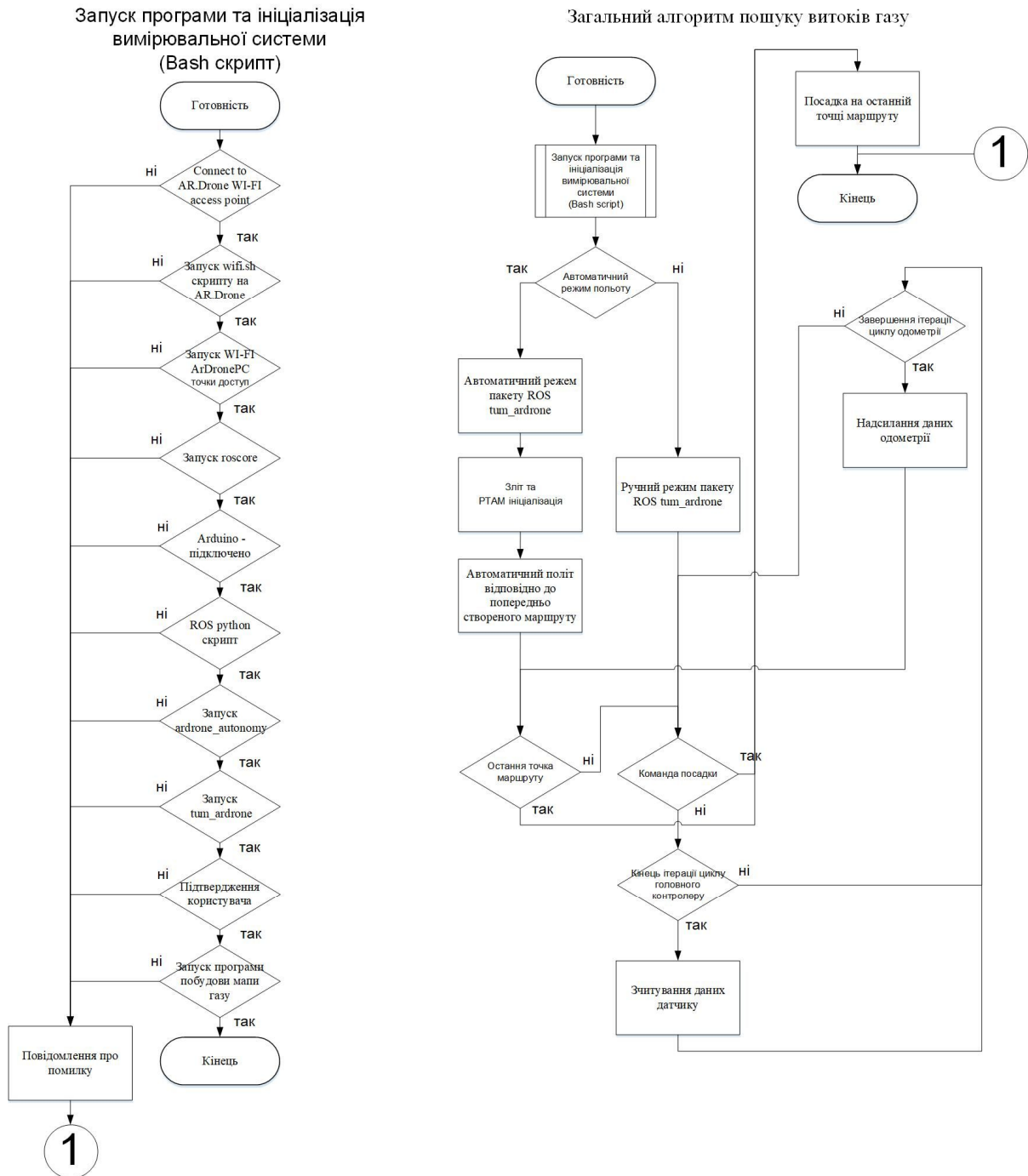


Рис. 5.26. Основний алгоритм автоматизованої мобільного бездротової системи моніторингу

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ

Всі експерименти, які були виконані в цій частині, проводилися з використанням платформи мБПЛА з підключеним газоаналізатором.

6.1. Статичний експеримент

Основною ідеєю проведення статичного експерименту є вивчення залежності відстані джерела газу до вимірювальної системи та покази концентрації газу.

Було проведено статичні вимірювання з вимірювання сталої концентрації метану, використовуючи описані в пунктах 5.3 – 5.4 установки, в лабораторії ДП «Житомирстандартметрології». Отримані результати для датчиків MQ-5 (рис. 6.1) та MQ-9 (рис. 6.2), зображено на відповідних графіках.

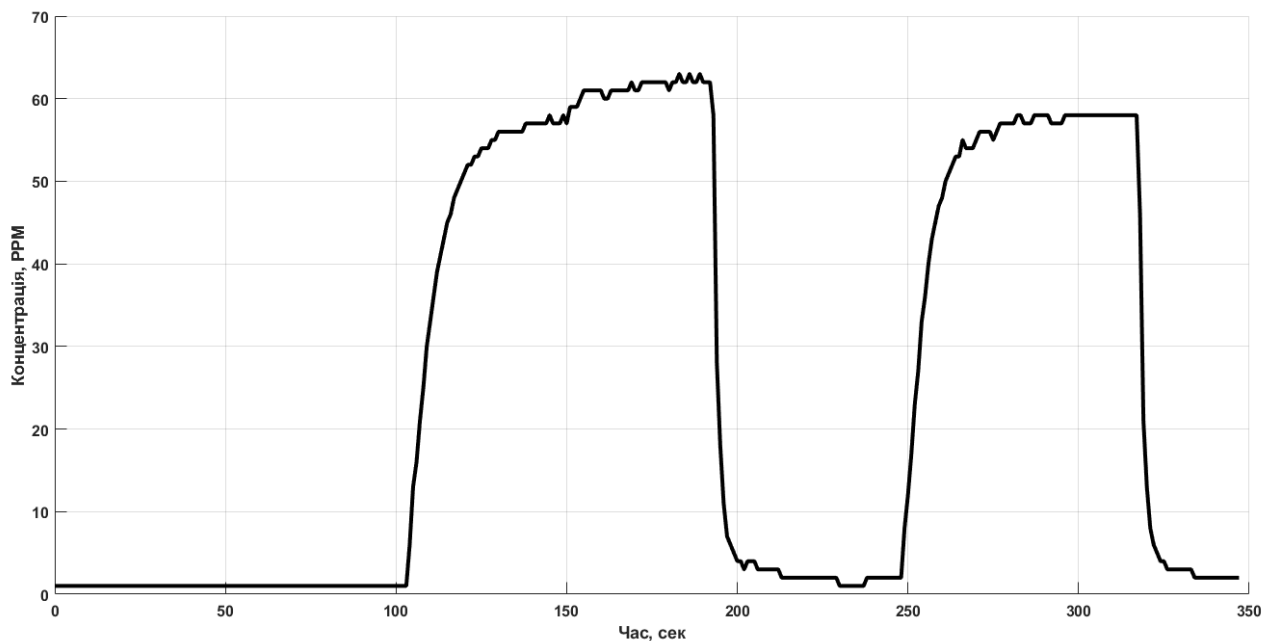


Рис 6.1. Графік зміни концентрації метану в часі для датчика MQ-5

З першого графіка видно, що в першому вимірюванні значення виходить на поточне за 70 секунд, але пікова концентрація не є рівномірною і коливається між 61 та 63 ppm. Повернення у вихідне значення відбувається за 38 секунд.

У другому вимірюванні спостережується більш рівномірне пікове значення в 58 ppm. Вихід від номінальної до пікової концентрації відбувається за 60

секунд, що на 14% швидше за попередній, а повернення у початкове значення за 18 секунд, що на 53% швидше.

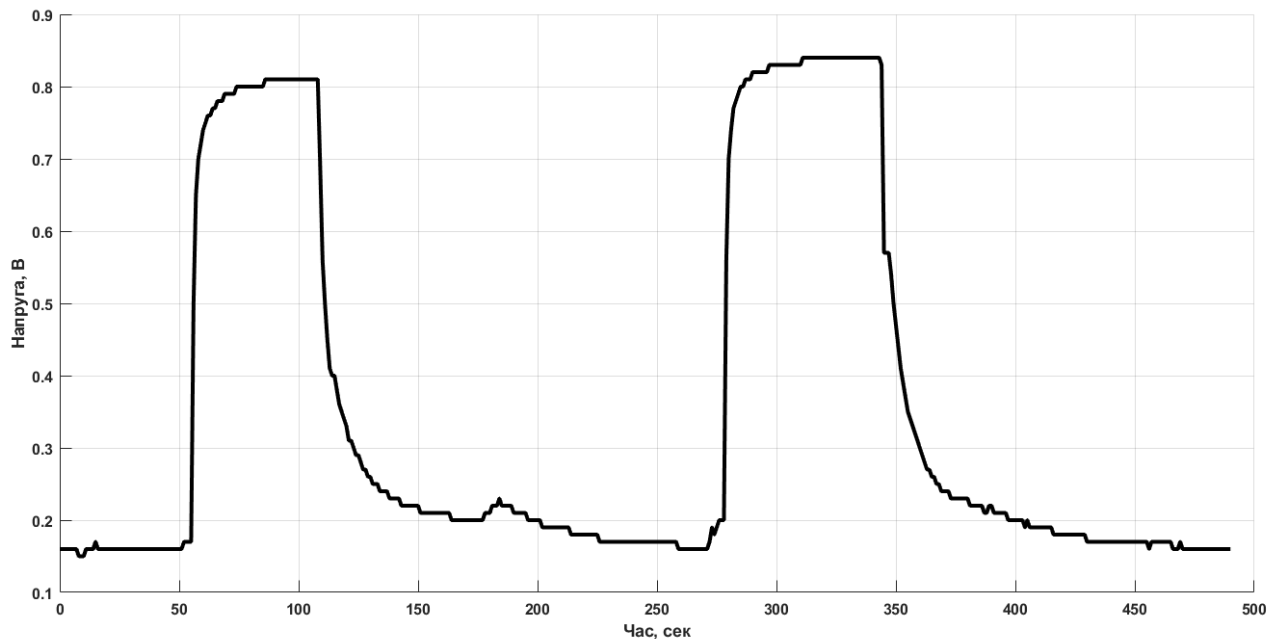


Рис 6.2. Графік зміни вихідної напруги в часі для датчика MQ-9

З другого графіка можна побачити, що в першому вимірюванні значення напруги виходить на поточне за 36 секунд і швидко фіксується на значенні 0,81 В. Але помітним недоліком даної установки є те, що повернення у номінальне значення відбувається досить довго – цілих 152 секунди.

В другому вимірюванні спостерігається схоже: швидкість стабілізації значення напруги – 41 секунда, а повернення у номінальне значення за 128 секунд.

У кожній з установок є свої переваги та недоліки. Нерівномірні пікові значення в першій установці можна пояснити шумами, які створюють надто довгі проводи-конектори, але ця проблема легко усувається мінімізацією їх довжини та екрануванням. Друга установка показала також досить непоганий результат, хоча й період одного вимірювання (від номінального до номінального значення) у неї досить великий – 209 секунд проти 128 секунд в першій установці.

Отже, враховуючи всі проведені вимірювання і їх аналіз, можна зробити висновок про доцільність використання будь-якої із запропонованих

установок, так як результати цілком задовольняють необхідній швидкості реакції на зміну газового середовища.

Проведення наступного статичного експерименту (рис. 6.3) було на відкритому повітрі, де досліджено залежність вимірюваної концентрації газу від відстані між джерелом газу та вимірювальним модулем. На першій стадії вимірювальний модуль розташовувався на відстані 100 см від джерела газу. Далі починався запис даних про концентрацію газу, після чого відкрився газовий балон, і вмикався вентилятор, що створює напрямлений вітровий потік поблизу джерела газу. Коли вимірюваний рівень газу досягав усталеного значення, газовий балон закривався, і протягом деякого часу вимірювання тривало, поки рівень газу не досягне нульового рівня (мінімальна вимірювана концентрація для даного типу датчику). Схема проведення експериментів показана на рис. 6.3, а результати вимірів на рис. 6.4.

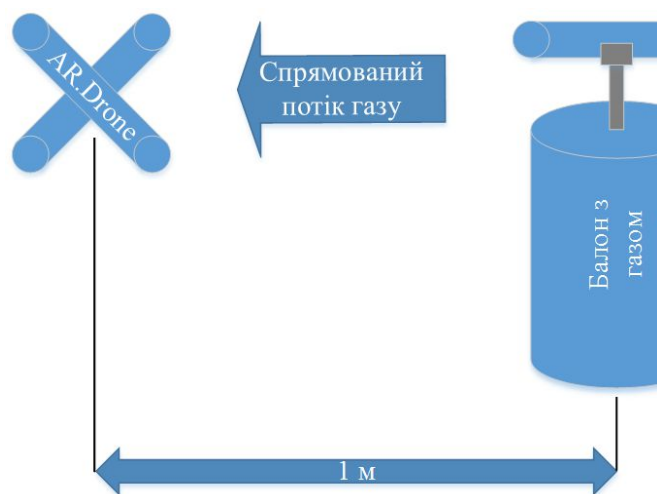


Рис. 6.3. Методика проведення експерименту

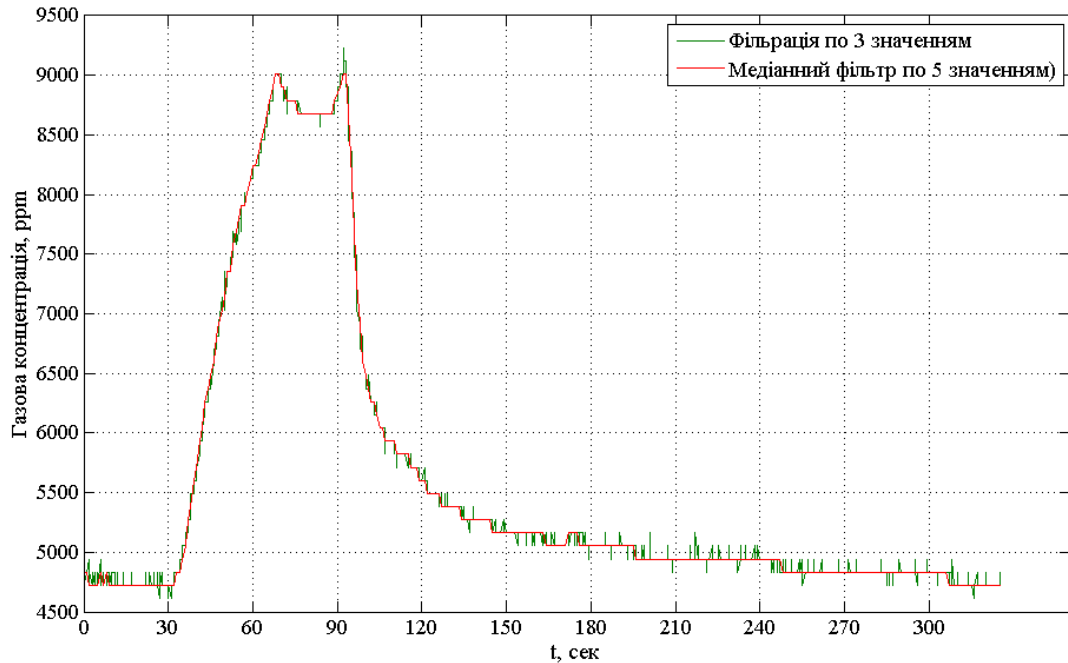


Рис. 6.4. Вимірювання концентрації газу в лабораторних умовах на відкритому повітрі (відстань від джерела газу 1 м)

Під час проведення ще одного статичного експерименту, на першому етапі вимірювальна система розташована на відстані 30 см від джерела газу, і починала записувати вимірювальні параметри, після чого відкрився газовий балон, і вмикався вентилятор, що створює прямий вітровий потік поблизу джерела газу. Потім, коли вимірювання рівню газу було завершено, газовий балон закривався, і протягом деякого часу вимірювання тривало, доки рівень газу не досягне позначки стан без газу. Коли цей експеримент закінчився, наступний експеримент починався з іншої відстані. Відстані були вибрані в діапазоні 30 – 130 см з кроком 10 см. Після 130 см можливість виявити газ все ще присутня, але, так як джерело газу та вимірювальної системи були розташовані на одному рівні, збільшення відстані було припинено. Техніка експериментів зображена на рис. 6.5.

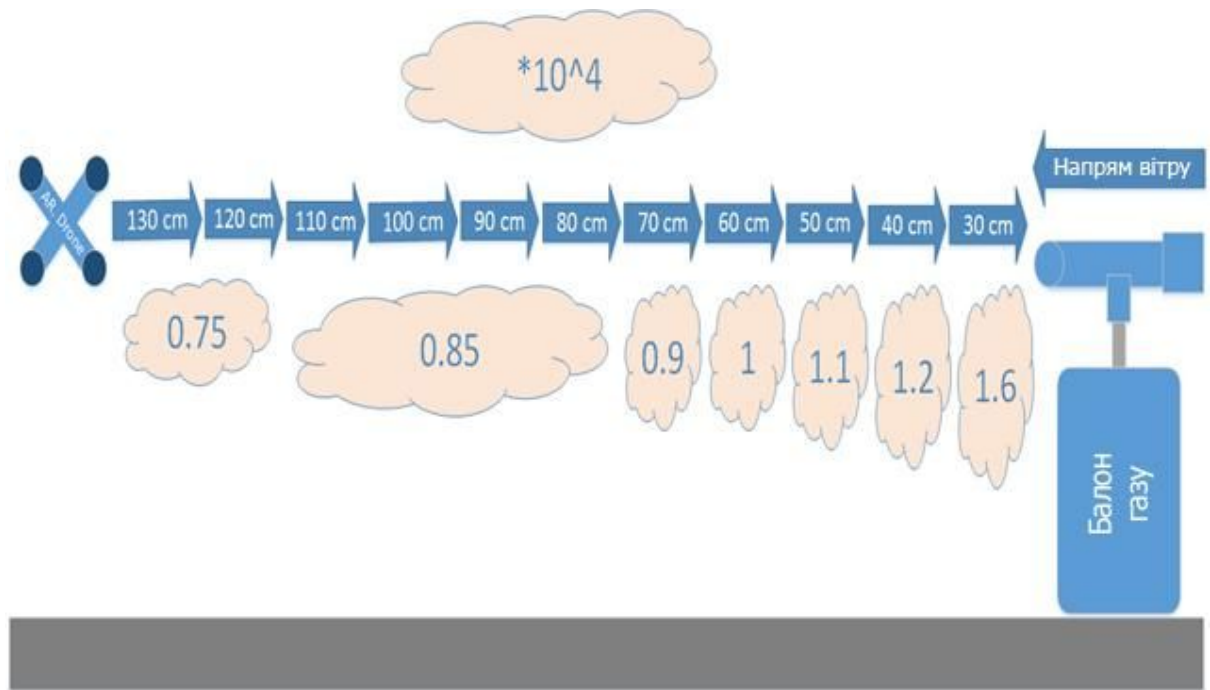


Рис. 6.5. Техніка проведення статичного експерименту

Статичний експеримент, що демонструє кореляцію між відстанню від джерела газу та вимірним рівнем концентрації газу, зображений на рис. 6.6.

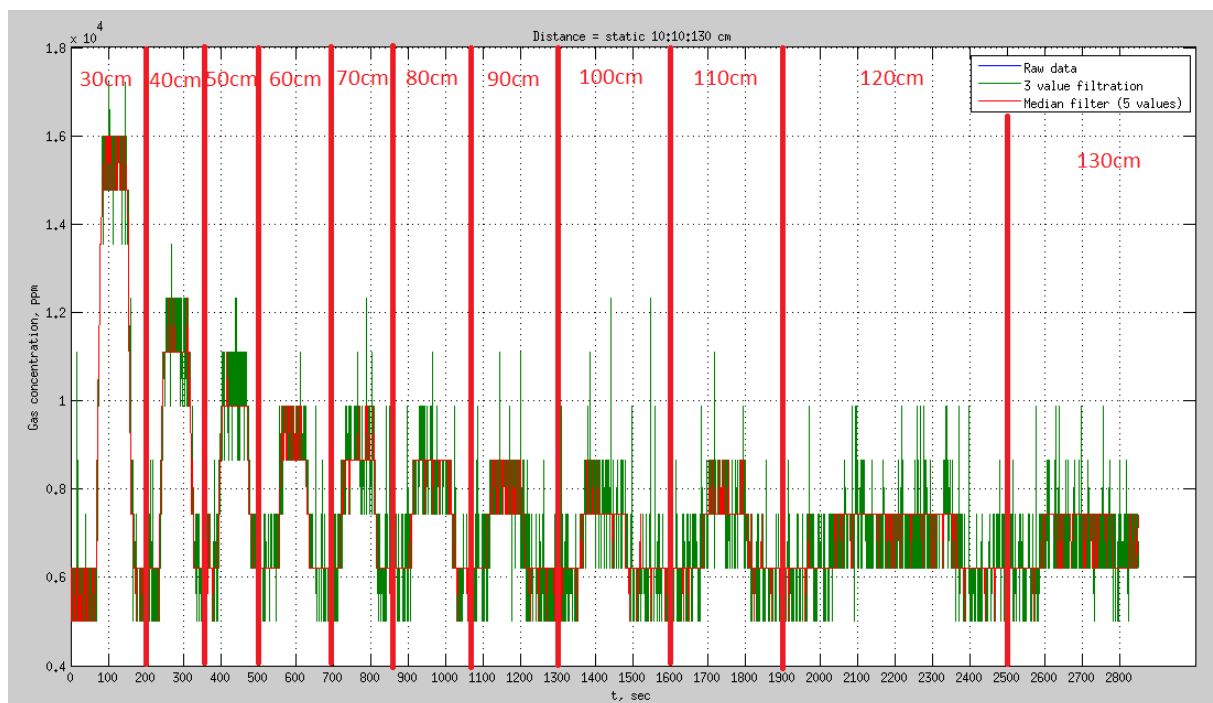


Рис. 6.6. Статичний експеримент, відстань: 0 – 130 см, крок вимірювання – 10 см (у – концентрація газу, х – час)

До речі, якщо джерело газу розташовано нижче, ніж вимірювальний сенсор – о чутливість сенсора газу збільшується. Це викликано тим, що бутан, який використовувався для експериментів, легший за повітря.

Нижче наведені експериментальні виміри LPG (рис 6.7), атмосферного повітря (рис 6.8) та CO₂ (рис 6.9).

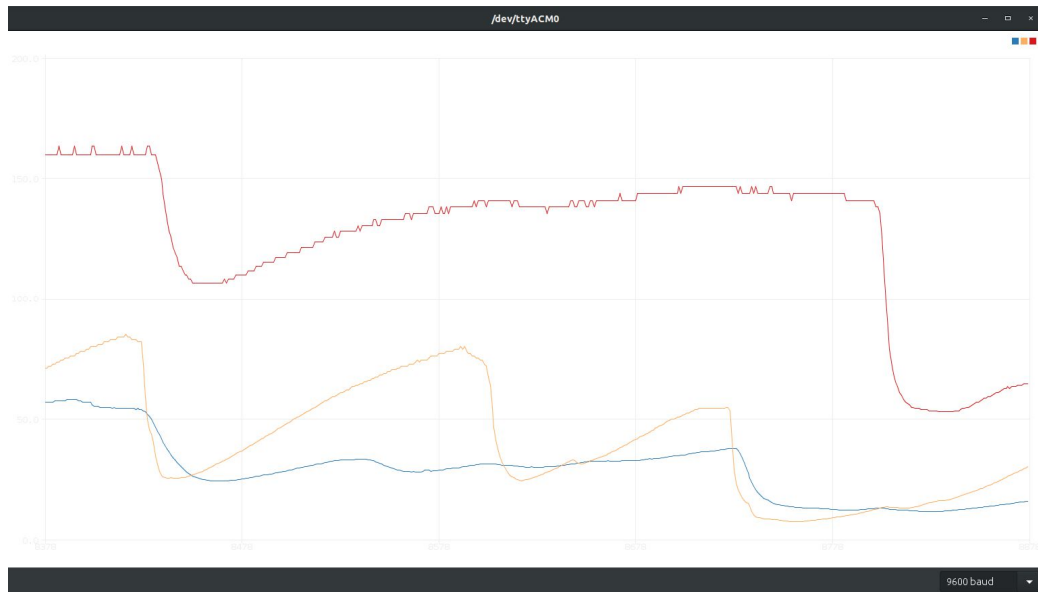


Рис 6.7. Реакція на зміну кількості LPG у навколишньому середовищі (Червоний графік - ppm MQ135, Синій графік – ppm MQ5, Оранжевий графік - ppm MQ7)

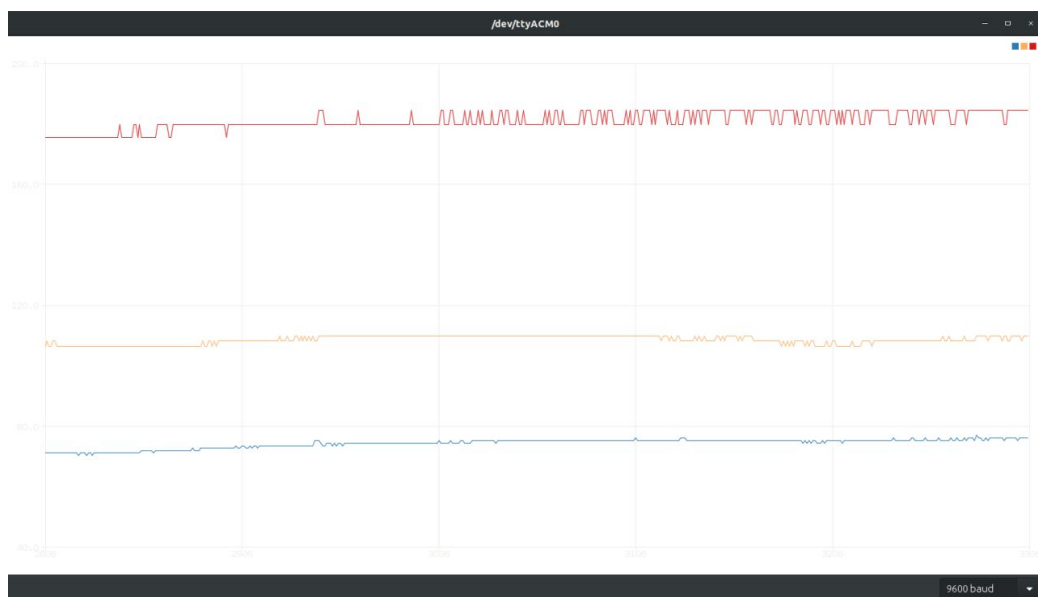


Рис 6.8. Покази датчиків звичайного атмосферного повітря (Червоний графік - ppm MQ135, Синій графік – ppm MQ5, Оранжевий графік - ppm MQ7)

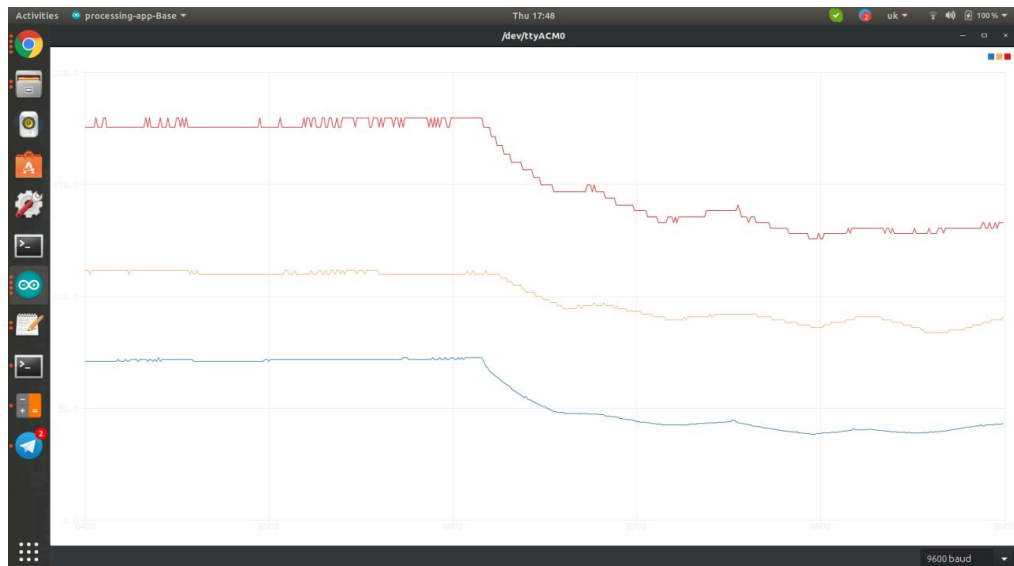


Рис 6.9. Реакція на зміну кількості CO₂ у навколишньому середовищі (Червоний графік - ppm MQ135, Синій графік – ppm MQ5, Оранжевий графік - ppm MQ7)

6.2. Льотний експеримент

Льотні експерименти показують кореляцію між відстанню від джерела газу та вимірним рівнем концентрації газу, під час автоматичного польоту. Методика проведення експериментів наведена на рис. 6.10.

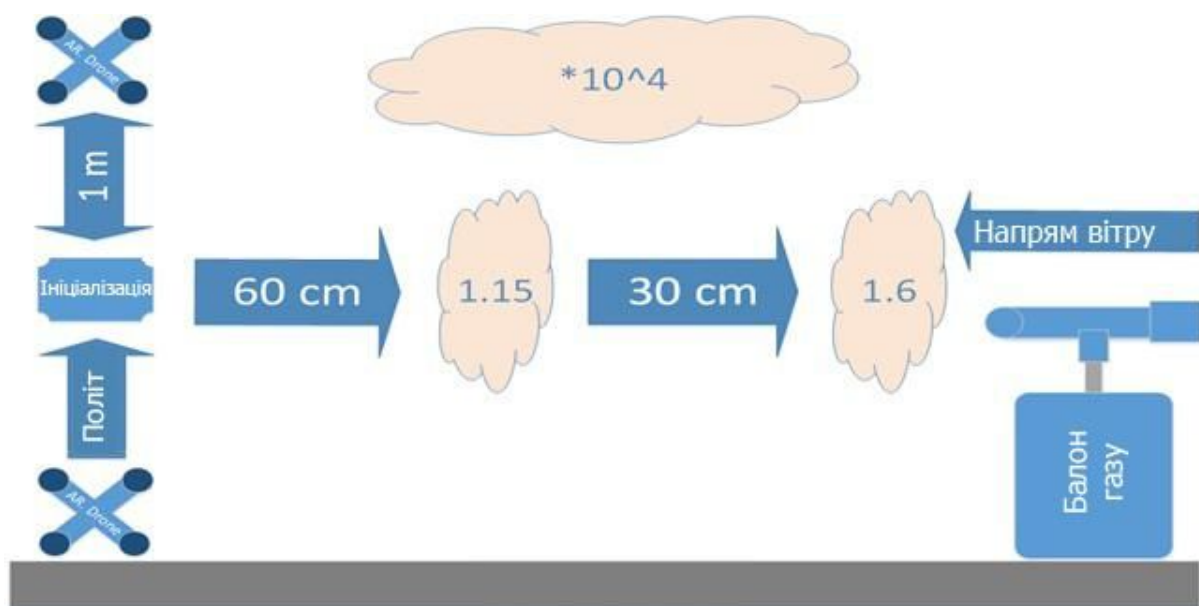


Рис. 6.10. Техніка проведення льотних експериментів

Згідно з рис. 6.11 можна помітити, що під час польоту виявлення рівня газу гірше, ніж у статичному режимі. Деякий вплив на покази вимірювань був створений пропелерами квадрокоптеру і саме це пояснює різницю між вимірами в статичному та льотному режимах.

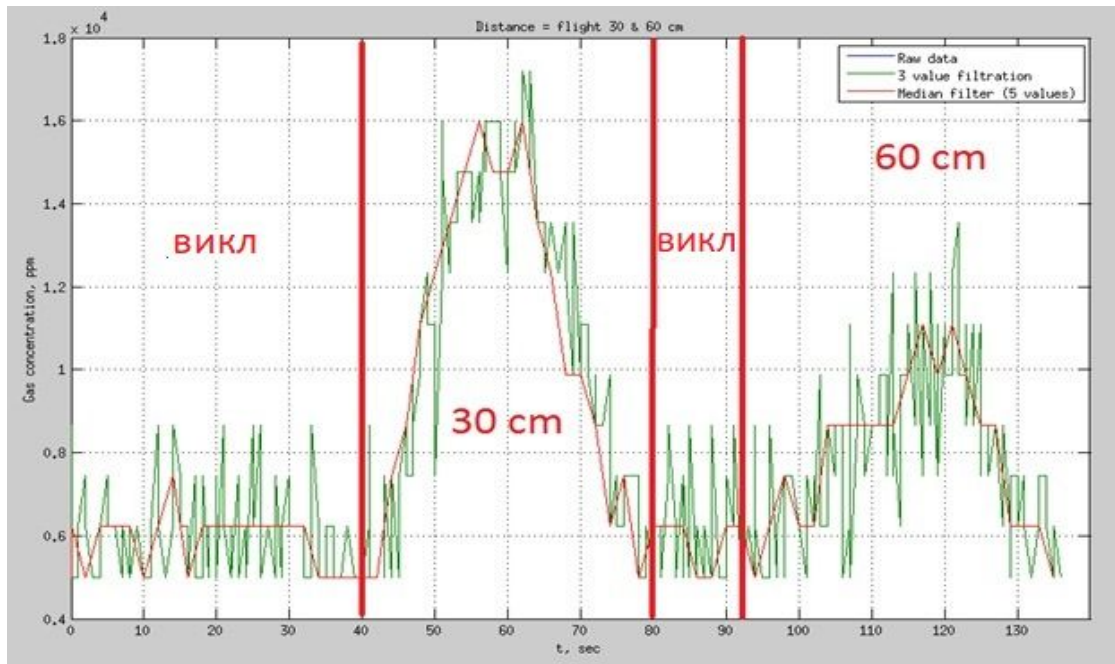


Рис. 6.11. Результати льотних експериментів (у – концентрація газу, х – час) на відстані 30 та 60 см від джерела газу

Побудована мапа концентрації газу в результаті проведених лабораторних вимірювань предсталена на рис. 6.12.

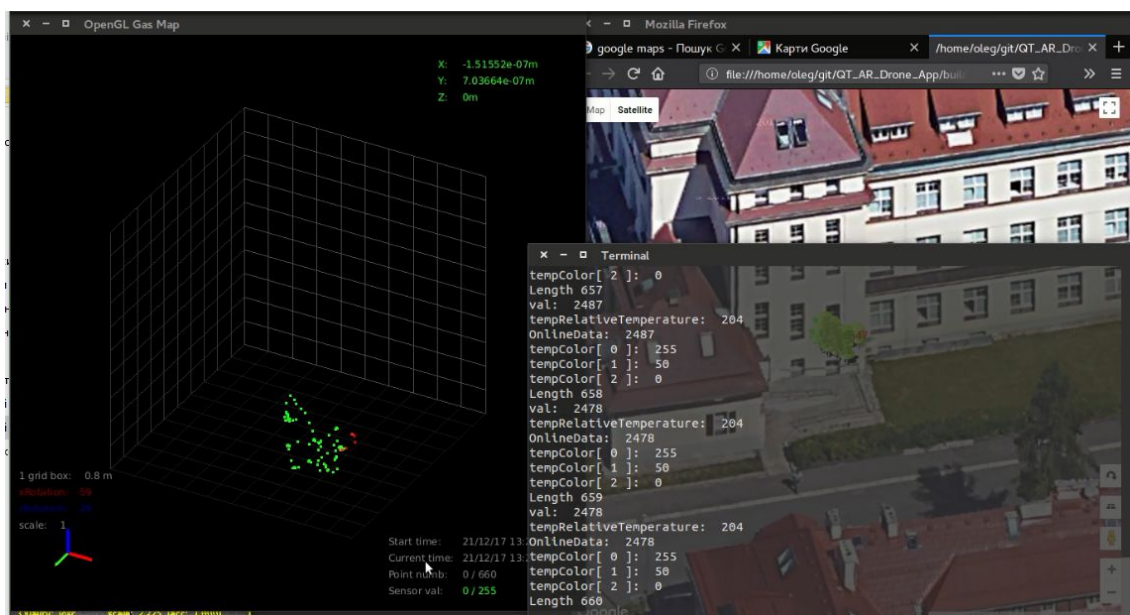


Рис. 6.12. Мапа газу під час тестування програми побудови мапи газу

ВИСНОВКИ

На основі здійсненого аналізу наукових досліджень у галузі створення автоматизованих систем моніторингу наявності вибухонебезпечних та шкідливих газів було визначено, що в існуючих системах газоаналізу в робочих зонах дані про стан газового середовища в кращому випадку надходять до централізованої системи АСУТП, де відбувається прийняття рішень про подальші дії, а в гіршому випадку – системи газоаналізу просто сповіщають персонал про наявність витoku чи перевищення концентрації того чи іншого газу за допомогою світлозвукової сигналізації.

Була запропонована автоматизована система пошуку небезпечних газів на базі міні БПЛА, представлена загальна функціональна схема та запропоновано методологію побудови та проведення вимірювань автоматизованими системами моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на основі міні безпілотних літальних апаратів. Проведено огляд характеристик рам для квадрокоптера. Проаналізовано та обрано автопілот, апаратуру керування, регулятори ходу, акумулятор, пропелери та двигуни (розраховано частоту обертання мотора, максимальну тягову вагу, тягу кожного двигуна з урахуванням ваги повністю спорядженого дрона).

Побудовано мБПЛА, проведено встановлення ОС на контролер польоту Pixhawk за допомогою програмного середовища Mission Planner. Проведено калібровку акселерометра, компаса апаратури управління, проведено налаштування функції Failsafe та калібровку ESC. Налаштовано ПІД регулятор.

В якості чутливих елементів системи пошуку та виявлення газів було обрано датчики напівпровідникового типу MQ135, MQ-5 та MQ-9, які задовольняють всім необхідним вимогам для встановлення на міні БПЛА.

Для правильної роботи сенсора було розроблено електричну принципову схему підключення датчика MQ-х.

Наведено програмні коди у програмі Arduino IDE для зняття показів з датчиків MQ-5 та MQ-9.

Було проведено статичні вимірювання з вимірювання сталої концентрації метану. На основі їх аналізу, було зроблено висновок про доцільність використання будь-якого із запропонованих датчиків для встановлення на БПЛА, так як результати цілком задовольняють необхідній швидкості реакції на зміну газового середовища.

В програмному середовищі SolidWorks була розроблена об'ємна модель корпусу з урахуванням усіх необхідних розмірів.

Проведено моделювання потоків повітря створюваних пропелерами квадрокоптера у програмному продукті SolidWorks. І зроблено висновок про оптимальне положення на корпусі міні БПЛА блоку з газовими датчиками. Аналіз ймовірних схем розміщення газоаналізатору на БПЛА показав, що повітряний потік, створюваний роторами, робить найменший вплив при його розміщенні поза рамою. На схемі, де пристрій розміщувався нижче або над квадрокоптером, вплив потоків повітря в середньому однаковий, але, згідно аналізу впливу турбулентності, його розміщення нижче БПЛА є більш доцільним. Розглядаючи, яку схему розміщення вибрати, варто зазначити, що схема 1 є більш простою і надає менший вплив на стабільність квадروتора, тоді як схема 3 є більш складною.

У співпраці з Університетом країни Басків (Більбао, Іспанія) було проведено експериментальні льотні випробування з вимірюванням забрудненості повітря метаном та побудови мапи газу.

В результаті проведених досліджень була розроблена мобільна вимірювальна система, що складається з мБПЛА, базової станції з ROS та газоаналізатора. Проведені експериментальні дослідження показали, що система здатна виявляти шкідливі та вибухонебезпечні гази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Monks, P.S.; Granier, C.; Fuzzi, S.; Stohl, A.; Williams, M.L.; Akimoto, H.; Amann, M.; Baklanov, A.; Baltensperger, U.; Bey, I.; et al. Atmospheric composition change—Global and regional air quality. *Atmos. Environ.* 2009, *43*, 5268–5350.
2. Dockery, D.W.; Pope, C.A.; Xu, X.; Spengler, J.D.; Ware, J.H.; Fay, M.E.; Ferris, B.G.; Speizer, F.E. An association between air pollution and mortality in six U.S. Cities. *N. Engl. J. Med.* 1993, *329*, 1753–1759.
3. Schwartz, J.; Laden, F.; Zanobetti, A. The concentration-response relation between PM_{2.5} and daily deaths. *Environ. Health Perspect.* 2002, *110*, 1025–1029.
4. Lim, S.S.; Vos, T.; Flaxman, A.D.; Danaei, G.; Shibuya, K.; Adair-Rohani, H.; AlMazroa, M.A.; Amann, M.; Anderson, H.R.; Andrews, K.G.; et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: A systematic analysis for the global burden of disease study 2010. *Lancet* 2012, *380*, 2224–2260.
5. Hansen, J.; Nazarenko, L. Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2004, *101*, 423–428.
6. Jacobson, M.Z.; Kaufman, Y.J. Wind reduction by aerosol particles. *Geophys. Res. Lett.* 2006, *33*.
7. Ramanathan, V.; Crutzen, P.J.; Lelieveld, J.; Mitra, A.P.; Althausen, D.; Anderson, J.; Andreae, M.O.; Cantrell, W.; Cass, G.R.; Chung, C.E.; et al. Indian ocean experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2001, *106*, 28371–28398.
8. Kaufman, Y.J.; Tanre, D.; Boucher, O. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature* 2002, *419*, 215–223.
9. Podgorny, I.A.; Ramanathan, V. A modeling study of the direct effect of aerosols over the tropical Indian ocean. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2001, *106*, 24097–24105.
10. Menon, S.; Hansen, J.; Nazarenko, L.; Luo, Y.F. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science* 2002, *297*, 2250–2253.

11. Lelieveld, J.; Berresheim, H.; Borrmann, S.; Crutzen, P.J.; Dentener, F.J.; Fischer, H.; Feichter, J.; Flatau, P.J.; Heland, J.; Holzinger, R.; et al. Global air pollution crossroads over the mediterranean. *Science* 2002, *298*, 794–799.

12. Seinfeld, J.H.; Pandis, S.N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2012.

13. Jacob, D.J.; Crawford, J.H.; Maring, H.; Clarke, A.D.; Dibb, J.E.; Emmons, L.K.; Ferrare, R.A.; Hostetler, C.A.; Russell, P.B.; Singh, H.B.; et al. The arctic research of the composition of the troposphere from aircraft and satellites (arctas) mission: Design, execution, and first results. *Atmos. Chem. Phys.* 2010, *10*, 5191–5212.

14. Cho, J.Y.N.; Newell, R.E.; Bui, T.P.; Browell, E.V.; Fenn, M.A.; Mahoney, M.J.; Gregory, G.L.; Sachse, G.W.; Vay, S.A.; Kucsera, T.L.; et al. Observations of convective and dynamical instabilities in tropopause folds and their contribution to stratosphere-troposphere exchange. *J. Geophys. Res. Atmos.* 1999, *104*, 21549–21568.

15. Toon, O.B.; Starr, D.O.; Jensen, E.J.; Newman, P.A.; Platnick, S.; Schoeberl, M.R.; Wennberg, P.O.; Wofsy, S.C.; Kurylo, M.J.; Maring, H.; et al. Planning, implementation, and first results of the tropical composition, cloud and climate coupling experiment (tc4). *J. Geophys. Res. Atmos.* 2010, *115*, D00J04.

16. Pearman, G.I.; Beardsmore, D.J.; O'Brien, R.C. *The CSIRO (Australia) Atmospheric Carbon Dioxide Monitoring Program: Ten Years of Aircraft Data*; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization: Melbourne, Australia, 1983; p. 115.

17. Simpson, I.J.; Colman, J.J.; Swanson, A.L.; Bandy, A.R.; Thornton, D.C.; Blake, D.R.; Rowland, F.S. Aircraft measurements of dimethyl sulfide (DMS) using a whole air sampling technique. *J. Atmos. Chem.* 2001, *39*, 191–213.

18. Buhr, M.; Sueper, D.; Trainer, M.; Goldan, P.; Kuster, B.; Fehsenfeld, F.; Kok, G.; Shillawski, R.; Schanot, A. Trace gas and aerosol measurements using aircraft data from the north atlantic regional experiment (nare 1993). *J. Geophys. Res. Atmos.* 1996, *101*, 29013–29027.

19. Brenninkmeijer, C.A.M.; Crutzen, P.J.; Fischer, H.; Gusten, H.; Hans, W.; Heinrich, G.; Heintzenberg, J.; Hermann, M.; Immelmann, T.; Kersting, D.; et al. Caribic-civil aircraft for global measurement of trace gases and aerosols in the tropopause region. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1999, *16*, 1373–1383.
20. Karion, A.; Sweeney, C.; Wolter, S.; Newberger, T.; Chen, H.; Andrews, A.; Kofler, J.; Neff, D.; Tans, P. Long-term greenhouse gas measurements from aircraft. *Atmos. Meas. Tech.* 2013, *6*, 511–526.
21. Wich, S.; Koh, L.P. Conservation drones. *GIM Int.* 2012, *26*, 29–33.
22. Martin, R.V. Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmos. Environ.* 2008, *42*, 7823–7843.
23. Wespes, C.; Emmons, L.; Edwards, D.P.; Hannigan, J.; Hurtmans, D.; Saunois, M.; Coheur, P.F.; Clerbaux, C.; Coffey, M.T.; Batchelor, R.L.; et al. Analysis of ozone and nitric acid in spring and summer arctic pollution using aircraft, ground-based, satellite observations and Mozart-4 model: Source attribution and partitioning. *Atmos. Chem. Phys.* 2012, *12*, 237–259.
24. Miller, D.J.; Sun, K.; Zondlo, M.A.; Kanter, D.; Dubovik, O.; Welton, E.J.; Winker, D.M.; Ginoux, P. Assessing boreal forest fire smoke aerosol impacts on U.S. Air quality: A case study using multiple data sets. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2011, *116*.
25. Corrigan, C.E.; Roberts, G.C.; Ramana, M.V.; Kim, D.; Ramanathan, V. Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the Indian ocean using autonomous unmanned aerial vehicles. *Atmos. Chem. Phys.* 2008, *8*, 737–747.
26. Dubovik, O.; Smirnov, A.; Holben, B.N.; King, M.D.; Kaufman, Y.J.; Eck, T.F.; Slutsker, I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from aerosol robotic network (AERONET) sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2000, *105*, 9791–9806.
27. Levy, R.C.; Remer, L.A.; Kaufman, Y.J. Effects of neglecting polarization on the modis aerosol retrieval over land. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2004, *42*, 2576–2583.
28. Curry, J.; Maslanik, J.; Holland, G.; Pinto, J. Applications of aerosondes in the arctic. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2004, *85*, 1855–1861.

29. Soddell, J.R.; McGuffie, K.; Holland, G.J. Intercomparison of atmospheric soundings from the aerosonde and radiosonde. *J. Appl. Meteorol.* 2004, *43*, 1260–1269.
30. Villa, T. F., Gonzalez, F., Miljievic, B., Ristovski, Z. D., & Morawska, L. (2016). An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives. *Sensors*, *16*(7), 1072.
31. Barnhart, R.K. *Introduction to Unmanned Aircraft Systems*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2012.
32. Holland, G.; McGeer, T.; Youngren, H. Autonomous aerosondes for economical atmospheric soundings anywhere on the globe. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1992, *73*, 1987–1998.
33. Watts, A.C.; Ambrosia, V.G.; Hinkley, E.A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sens.* 2012, *4*, 1671–1692.
34. Colomina, I.; Molina, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Photogramm. Remote Sens.* 2014, *92*, 79–97.
35. Fahlstrom, P.G.; Gleason, T.J. Classes and missions of UAVs. In *Introduction to UAV Systems*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2012; pp. 17–31.
36. Technology, Cyber. 2016. Available online: <http://www.cybertechuav.com.au/> (accessed on 7 July 2016).
37. Silvertone. 2013. Available online: <http://www.silvertone.com.au/content/flamingo-uav-overview> (accessed on 7 July 2016).
38. Sensefly. 2015. Available online: <https://www.sensefly.com/drones/overview.html> (accessed on 7 July 2016).
39. Asctec. 2016. Available online: <http://www.asctec.de/en/uav-uas-drones-rpas-roav/asctec-pelican/> (accessed on 7 July 2016).
40. DJI. 2016. Available online: <http://www.dji.com/product/flame-wheel-arf> (accessed on 7 July 2016).

41. DJI. DJI S800-evo. 2014. Available online: <http://www.dji.com/product/spreading-wings-s800-evo> (accessed on 7 July 2016).
42. Gatewing. Available online: <http://www.gatewing.com> (accessed on 8 October 2014).
43. (ARCAA), Australian Research Centre for Aerospace Automation. Enhanced Flight Assist System (eFAS) for automated Aerial Survey of Powerline Networks. Available online: <http://www.arcaa.net/research/enhanced-flight-assist-system-efas-for-automated-aerial-survey-of-powerline-networks/> (accessed on 8 October 2014).
44. Bachrach, A.; He, R.; Roy, N. Autonomous flight in unknown indoor environments. *Int. J. Micro Air Veh.* 2009, *1*, 217–228.
45. Fahlstrom, P.G.; Gleason, T.J. Mission planning and control. In *Introduction to UAV Systems*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2012; p. 99.
46. Fahlstrom, P.G.; Gleason, T.J. Mission planning and control station. In *Introduction to UAV Systems*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2012; pp. 101–118.
47. Fahlstrom, P.G.; Gleason, T.J. Air vehicle and payload control. In *Introduction to UAV Systems*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2012; pp. 119–130.
48. Chwaleba, A.; Olejnik, A.; Rapacki, T.; Tuśnio, N. Analysis of capability of air pollution monitoring from an unmanned aircraft. *Aviation* 2014, *18*, 13–19.
49. Antonio, P.; Grimaccia, F.; Mussetta, M. Architecture and methods for innovative heterogeneous wireless sensor network applications. *Remote Sens.* 2012, *4*, 1146–1161.
50. Skoglar, P.; Orguner, U.; Törnqvist, D.; Gustafsson, F. Road target search and tracking with gimballed vision sensor on an unmanned aerial vehicle. *Remote Sens.* 2012, *4*, 2076–2111.
51. Novaković, Z.; Medar, N. Analysis of a UAV bungee cord launching device. *Sci. Tech. Rev.* 2013, *63*, 41–47.
52. Drury, J.L.; Scott, S.D. Awareness in unmanned aerial vehicle operations. *Int.*

C2 J. 2008, 2, 1–10.

53. Wyllie, T. Parachute recovery for UAV systems. *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* 2001, 73, 542–551.

54. Woolley, C.C.A.; Beggs, K.W.; Bakewell, R.A.; Axford, R.D.J.; Wainwright, J. Launch System. U.S. Patent 8,584,985, 19 November 2013.

55. Su, Z.-Z.; Zhang, B.; Guo, W.; Liu, X.-C.; Qu, W.-B. A review of electromagnetic launch technology used in UAV. *J. Gun Launch Control* 2011, 1, 023.

56. Fahlstrom, P.G.; Gleason, T.J. Launch systems. In *Introduction to UAV Systems*, 4th ed.; John Wiley & Sons, Ltd.: Hoboken, NJ, USA, 2012; pp. 249–260.

57. Ozdemir, U.; Aktas, Y.; Vuruskan, A.; Dereli, Y.; Tarhan, A.; Demirbag, K.; Erdem, A.; Kalaycioglu, G.; Ozkol, I.; Inalhan, G. Design of a commercial hybrid vtol UAV system. *J. Intell. Robot. Syst.* 2014, 74, 371–393.

58. Everaerts, J. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2008, 37, 1187–1192.

59. Jensen, T.; Apan, A.; Young, F.; Zeller, L. Detecting the attributes of a wheat crop using digital imagery acquired from a low-altitude platform. *Comput. Electron. Agric.* 2007, 59, 66–77.

60. Inoue, Y.; Morinaga, S.; Tomita, A. A blimp-based remote sensing system for low-altitude monitoring of plant variables: A preliminary experiment for agricultural and ecological applications. *Int. J. Remote Sens.* 2000, 21, 379–385.

61. Reuder, J.; Jonassen, M.; Ólafsson, H. The small unmanned meteorological observer sumo: Recent developments and applications of a micro-uas for atmospheric boundary layer research. *Acta Geophys.* 2012, 60, 1454–1473.

62. Techy, L.; Schmale, D.G., III; Woolsey, C.A. Coordinated aerobiological sampling of a plant pathogen in the lower atmosphere using two autonomous unmanned aerial vehicles. *J. Field Robot.* 2010, 27, 335–343.

63. Neumann, P.P.; Bennetts, V.H.; Lilienthal, A.J.; Bartholmai, M.; Schiller, J.H. Gas source localization with a micro-drone using bio-inspired and particle filter-

based algorithms. *Adv. Robot.* 2013, 27, 725–738.

64. Hausamann, D.; Zirinig, W.; Schreier, G.; Strobl, P. Monitoring of gas pipelines—A civil UAV application.

Aircr. Eng. Aerosp. Technol. 2005, 77, 352–360.

65. Watai, T.; Machida, T.; Ishizaki, N.; Inoue, G. A lightweight observation system for atmospheric carbon dioxide concentration using a small unmanned aerial vehicle. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2006, 23, 700–710.

66. Ramana, M.V.; Ramanathan, V.; Kim, D.; Roberts, G.C.; Corrigan, C.E. Albedo, atmospheric solar absorption and heating rate measurements with stacked UAVs. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2007, 133, 1913–1931.

67. Ramanathan, V. *Maldives AUAV Campaign (MAC): Observing Aerosol-Cloud-Radiation-Climate Interactions Simultaneously from three Stacked Autonomous Unmanned Aerial Vehicles (AUAVs)*; Report of the Field Campaign Held from March; National Science Foundation: Arlington, VA, USA, 2006; Volume 5.

68. Allen, G.; Hollingsworth, P.; Illingworth, S.; Kabbabe, K.; Perciva, C. *Feasibility of Aerial Measurements of Methane Emissions from Landfills*; Environmental Agency: Rotherham, UK, 2014.

69. Spiess, T.; Bange, J.; Buschmann, M.; Voersmann, P. First application of the meteorological mini-UAV ‘m(2)av’. *Meteorol. Z.* 2007, 16, 159–169.

70. Buschmann, M.; Bange, J.; Vörsmann, P. 6.7 MMAV—A Miniature Unmanned Aerial Vehicle (Mini-UAV) for Meteorological Purposes. Available online: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.134.3104>. (accessed on 7 July 2016).

71. Kroonenberg, A.V.D.; Martin, T.; Buschmann, M.; Bange, J.; Vörsmann, P. Measuring the wind vector using the autonomous mini aerial vehicle m2av. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2008, 25, 1969–1982.

72. Martin, S.; Bange, J.; Beyrich, F. Meteorological profiling of the lower troposphere using the research UAV “m2av carolo”. *Atmos. Meas. Tech.* 2011, 4, 705–716.

73. Mayer, S.; Sandvik, A.; Jonassen, M.; Reuder, J. Atmospheric profiling with the

UAS sumo: A new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models. *Meteorol. Atmos. Phys.* 2012, *116*, 15–26.

74. Reuder, J.; Brisset, P.; Jonassen, M.; Müller, M.; Mayer, S. The small unmanned meteorological observer sumo: A new tool for atmospheric boundary layer research. *Meteorol. Z.* 2009, *18*, 141–147.

75. Ramanathan, V.; Roberts, G.; Corrigan, C.; Ramana, M.; Nguyen, H. *Aerosol, Cloud, and Radiometric Measurements with Small Autonomous Unmanned Aerial Vehicles*; AGU Fall Meeting Abstracts; American Geophysical Union: Washington, DC, USA, 2005.

76. Ramanathan, V.; Ramana, M.V.; Roberts, G.; Kim, D.; Corrigan, C.; Chung, C.; Winker, D. Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption. *Nature* 2007, *448*, 575–578.

77. Bates, T.S.; Quinn, P.K.; Johnson, J.E.; Corless, A.; Brechtel, F.J.; Stalin, S.E.; Meinig, C.; Burkhardt, J.F. Measurements of atmospheric aerosol vertical distributions above svalbard, norway, using unmanned aerial systems (UAS). *Atmos. Meas. Tech.* 2013, *6*, 2115–2120.

78. Altstädter, B.; Platis, A.; Wehner, B.; Scholtz, A.; Lampert, A.; Wildmann, N.; Hermann, M.; Käthner, R.; Bange, J.; Baars, H. Aladina—An unmanned research aircraft for observing vertical and horizontal distributions of ultrafine particles within the atmospheric boundary layer. *Atmos. Meas. Tech. Discussions* 2014, *7*, 12283–12322.

79. Harrison, W.A.; Lary, D.J.; Nathan, B.J.; Moore, A.G. Using remote control aerial vehicles to study variability of airborne particulates. *Air Soil Water Res.* 2015, *8*, 43–51.

80. Nathan, B.J.; Golston, L.M.; O’Brien, A.S.; Ross, K.; Harrison, W.A.; Tao, L.; Lary, D.J.; Johnson, D.R.; Covington, A.N.; Clark, N.N.; et al. Near-field characterization of methane emission variability from a compressor station using a model aircraft. *Environ. Sci. Technol.* 2015, *49*, 7896–7903.

81. Brady, J.M.; Stokes, M.D.; Bonnardel, J.; Bertram, T.H. Characterization of a quadrotor unmanned aircraft system for aerosol-particle-concentration

measurements. *Environ. Sci. Technol.* 2016, 50, 1376–1383.

82. Mölders, N.; Butwin, M.K.; Madden, J.M.; Tran, H.N.; Sassen, K.; Kramm, G. Theoretical investigations on mapping mean distributions of particulate matter, inert, reactive, and secondary pollutants from wildfires by unmanned air vehicles (UAVs). *Open J. Air Pollut.* 2015, 4, 149.

83. Berman, E.S.F.; Fladeland, M.L.J.; Kolyer, R.; Gupta, M. Greenhouse gas analyzer for measurements of carbon dioxide, methane, and water vapor aboard an unmanned aerial vehicle. *Sens. Actuators B Chem.* 2012, 169, 128–135.

84. Fladeland, M.; Sumich, M.; Lobitz, B.; Kolyer, R.; Herlth, D.; Berthold, R.; McKinnon, D.; Monforton, L.; Brass, J.; Bland, G. The nasa sierra science demonstration programme and the role of small-medium unmanned aircraft for earth science investigations. *Geocarto Int.* 2011, 26, 157–163.

85. Malaver, A.; Gonzalez, F.; Depari, A.; Corke, P.; Motta, N. Towards the development of a gas sensor system for monitoring pollutant gases in the low troposphere using small unmanned aerial vehicles. *In Proceedings of Workshop on Robotics for Environmental Monitoring*, Sydney, Australia, 9–13 July 2012.

86. Malaver, A.; Motta, N.; Corke, P.; Gonzalez, F. Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases. *Sensors* 2015, 15, 4072–4096.

87. Malaver, A.J.R.; Gonzalez, L.F.; Motta, N.; Villa, T.F. Design and flight testing of an integrated solar powered UAV and WSN for remote gas sensing. *In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference 2015*, Big Sky, MT, USA, 7–14 March 2015.

88. Malaver Rojas, J.A.; Motta, N.; Peter, C.; John, B.; Alessandro, D. Development of a gas nanosensor node powered by solar cells. *In Proceedings of the Solar2011, the 49th AuSES Annual Conference*, Australian Technology Park, Sidney, Australia, 30 November–2 December 2011.

89. Rossi, M.; Brunelli, D.; Adami, A.; Lorenzelli, L.; Menna, F.; Remondino, F. Gas-drone: Portable gas sensing system on UAVs for gas leakage localization. *In Proceedings of the 2014 IEEE SENSORS*, Valencia, Spain, 2–5 November 2014; pp.

1431–1434.

90. Gallego, V.; Rossi, M.; Brunelli, D. Unmanned aerial gas leakage localization and mapping using microdrones. *In Proceedings of the 2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, Zadar, Croatia, 13–15 April 2015; pp. 1–6.

91. Illingworth, S.; Allen, G.; Percival, C.; Hollingsworth, P.; Gallagher, M.; Ricketts, H.; Hayes, H.; Ładosz, P.; Crawley, D.; Roberts, G. Measurement of boundary layer ozone concentrations on-board a skywalker unmanned aerial vehicle. *Atmos. Sci. Lett.* 2014, *15*, 252–258.

92. Lawrence, D.A.; Balsley, B.B. High-resolution atmospheric sensing of multiple atmospheric variables using the datahawk small airborne measurement system. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2013, *30*, 2352–2366.

93. Chao-Chung, P.; Chao-Yung, H. Integration of an unmanned vehicle and its application to real-time gas detection and monitoring. *In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)*, Taipei, Taiwan, 6–8 June 2015; pp. 320–321.

94. Danilov, A.; Smirnov, Y.; Petrova, T.; Pashkevich, M. Using drones of preconstruction monitoring conducting in mining enterprise. *Int. J. Ecol. Dev.* 2015, *30*, 36–42.

95. Han, J.; Xu, Y.; Di, L.; Chen, Y. Low-cost multi-UAV technologies for contour mapping of nuclear radiation field. *J. Intell. Robot. Syst.* 2013, *70*, 401–410.

96. Behnke, D.; Bok, P.B.; Wietfeld, C. UAV-based connectivity maintenance for borderline detection. *In Proceedings of the 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Dresden, Germany, 2–5 June 2013; pp. 1–6.

97. Alvarado, M.; Gonzalez, F.; Fletcher, A.; Doshi, A. Towards the development of a low cost airborne sensing system to monitor dust particles after blasting at open-pit mine sites. *Sensors* 2015, *15*, 19667.

98. Pollanen, R.; Toivonen, H.; Perajarvi, K.; Karhunen, T.; Smolander, P.; Ilander, T.; Rintala, K.; Katajainen, T.; Niemela, J.; Juusela, M.; et al. Performance of an air sampler and a gamma-ray detector in a small unmanned aerial vehicle. *J.*

Radioanal. Nucl. Chem. 2009, 282, 433–437.

99. Gottwald, T.R.; Tedders, W.L. A spore and pollen trap for use on aerial remotely piloted vehicles. *Phytopathology* 1985, 75, 801–807.

100. Schmale, D.G.; Dingus, B.R.; Reinholtz, C. Development and application of an autonomous unmanned aerial vehicle for precise aerobiological sampling above agricultural fields. *J. Field Robot.* 2008, 25, 133–147.

101. Lin, B.; Ross, S.D.; Prussin, A.J., II; Schmale, D.G., III. Seasonal associations and atmospheric transport distances of fungi in the genus *Fusarium* collected with unmanned aerial vehicles and ground-based sampling devices. *Atmos. Environ.* 2014, 94, 385–391.

102. Gonzalez, F.; Castro, M.P.G.; Narayan, P.; Walker, R.; Zeller, L. Development of an autonomous unmanned aerial system to collect time-stamped samples from the atmosphere and localize potential pathogen sources. *J. Field Robot.* 2011, 28, 961–976.

103. Anderson, G.P.; King, K.D.; Cuttino, D.S.; Whelan, J.P.; Ligler, F.S.; MacKrell, J.F.; Bovais, C.S.; Indyke, D.K.; Foch, R.J. Biological agent detection with the use of an airborne biosensor. *Field Anal. Chem. Technol.* 1999, 3, 307–314.

104. Ligler, F.S.; Anderson, G.P.; Davidson, P.T.; Foch, R.J.; Ives, J.T.; King, K.D.; Page, G.; Stenger, D.A.; Whelan, J.P. Remote sensing using an airborne biosensor. *Environ. Sci. Technol.* 1998, 32, 2461–2466.

105. Roldán, J.; Joossen, G.; Sanz, D.; del Cerro, J.; Barrientos, A. Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses. *Sensors* 2015, 15, 3334–3350.

106. Poyi, G.T.; Wu, M.H.; Bousbaine, A.; Wiggins, B. Validation of a quad-rotor helicopter matlab/simulink and solidworks models. In *Proceedings of the IET Conference on Control and Automation 2013: Uniting Problems and Solutions*, Birmingham, UK, 4–5 June 2013; pp. 1–6.

107. Aleksandrov, D.; Penkov, I. Optimal gap distance between rotors of mini quadrotor helicopter. In *Proceedings of the 8th DAAAM Baltic conference*. Tallinn, Estonia, 19–21 April 2012.

108. Daponte, P., De Vito, L., Mazzilli, G., Picariello, F., Rapuano, S., & Riccio, M. (2015, June). Metrology for drone and drone for metrology: Measurement systems on small civilian drones. In *Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), 2015 IEEE* (pp. 306-311). IEEE.
109. H.G.de Marina, Espinosa, C.Santos, “*Adaptive UAV attitude estimation employing unscented kalman filter, FOAM and low-cost MEMS sensors*”, *Journal of Sensors*, pp. 9566-9585, 2012.
110. VN-100 SMD from VectorNAV, description. Available online: <http://www.vectornav.com/products/vn100-smd>.
111. S.K.Phang, K.Li, B.M.Chen, T.H. Lee, “*Systematic design methodology and construction of micro aerial quadrotor vehicles*”, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Valavanis, P.Kimon, J.George, Vachtsevanos, Springer, pp. 181-206, 2014.
112. Kersnovski, T., Gonzalez, F., & Morton, K. (2017, March). A UAV system for autonomous target detection and gas sensing. In *Aerospace Conference, 2017 IEEE* (pp. 1-12). IEEE.
113. L.Mejias, J.Lai, T.Burggemann, “*Sensors for missions*”, *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, Valavanis, P.Kimon, J.George, Vachtsevanos, Springer, pp. 385-399, 2014.
114. C. V.Angelino, V. R.Baraniello, L.Cicala, “*UAV position and attitude estimation using IMU, GNSS and camera*”, 15th Int. Conf. on Information Fusion (FUSION), pp. 735-742, 9-12 July 2012.
115. A.Nemra, N.Aouf, “*Robust INS/GPS sensor fusion for UAV localization using SDRE nonlinear filtering*”, *IEEE Journal of Sensors*, vol. 10, no. 4, pp.789-798, April 2010.
116. F.Cocchioni, A.Mancini, S.Longhi, “*Autonomous navigation, landing and recharge of a quadrotor using artificial vision*”, Int. Conf. on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 418-429, 27-30 May 2014.
117. F.Cocchioni, A.Mancini, S.Longhi, “*A fully autonomous indoor quadrotor*”, *IEEE Tran. on Robotics*, vol. 28, no. 1, pp. 90-100, Feb. 2012.

118. K. P.Valavanis, G. J.Vachtsevanos, “*Sensors and sensing strategies: introduction*”, Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, Valavanis, P.Kimon, J.George, Vachtsevanos, Springer, pp. 383-384, 2014.
119. G. J.Grenzdorffer, A.Engel, B.Teichert, “*The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture*”, The Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 31, no. B3, pp. 1207-1214, 2008.
120. M.Kontitsis, K. P.Valavanis, N.Tsourveloudis, “*A UAV vision system for airborne surveillance*”, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.1, pp. 77-83, 26 April-1 May 2004.
121. O.Kung, C.Strecha, A.Beyeler, J. C.Zufferey, D.Floreano, P.Fua, F.Gervais, “*The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery*”, Int. Conf. on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, 14-16 Sep. 2011.
122. J. L.Huang, W. Y.Cai, “*UAV low altitude marine monitoring system*”, IEEE Int. Conf. on Wireless Communication and Sensor Network (WCSN), pp. 61-64, 13-14 Dec. 2014.
123. A. Y.Lin, A.Novo, H. N.Shay, N. D.Ricklin, K.Stamatiou, “*Combining geoeye-1 satellite remote sensing, UAV aerial imaging, and geophysical surveys in anomaly detection applied to archaeology*”, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 4, no. 4, pp. 870-876, Dec. 2011.
124. P. B.Quater, F.Grimaccia, S.Leva, M.Mussetta, M.Aghaei, “*Light Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for cooperative inspection of PV plants*”, IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 4, no. 4, pp. 1107-1113, July 2014.
125. J. M.Teixeira, R.Ferreira, M.Santos, V.Teichrieb, “*Teleoperation using google glass and AR, drone for structural inspection*”, XVI Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR), pp. 28-36, 12-15 May 2014.
126. J.Katrasnik, F.Pernus, B.Likar, “*A survey of mobile robots for distribution power line inspection*”, IEEE Tran. on Power Delivery, vol. 25, no. 1, pp. 485-493, Jan. 2010.

127. Neumann, P.P.; Asadi, S.; Lilienthal, A.J.; Bartholmai, M.; Schiller, J.H. Autonomous gas-sensitive microdrone: Wind vector estimation and gas distribution mapping. *IEEE Robot. Autom. Mag.* 2012, *19*, 50–61.

128. Lochmatter, T.; Martinoli, A. Theoretical analysis of three bio-inspired plume tracking algorithms. In Proceedings of the ICRA 109. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 12–17 May 2009; pp. 2661–2668.

129. Bennetts, V.H.; Lilienthal, A.J.; Neumann, P.P.; Trincavelli, M. Mobile robots for localizing gas emission sources on landfill sites: Is bio-inspiration the way to go? *Front. Neuroeng.* 2011, *4*, 20.

130. Neumann, P.P. Gas Source Localization and Gas Distribution Mapping with a Micro-Drone. Ph.D. Thesis, Freie Universität Berlin, Berlin, Germany, 2013.

131. Gerhardt, N.; Clothier, R.; Wild, G.; Mohamed, A.; Petersen, P.; Watkins, S. Analysis of inlet flow structures for the integration of a remote gas sensor on a multi-rotor unmanned aircraft system. In Proceedings of the ACUS 2014: Fourth Australasian Unmanned Systems Conference, Melbourne, Australia, 15–16 December 2014; pp. 1–6.

132. Allen, M.J.P.G.; Hollingsworth, P.; Mead, I.; Kabbabe, K.; Roberts, G.; Percival, C. Measuring Landfill Methane Emissions Using Unmanned Aerial Systems: Field Trial and Operational Guidance. Environment Agency: Horizon House, Deanery Road, Bristol, BS1 5AH, 2016; Available online: www.gov.uk/government/organisations/environmentagency (accessed on 7 July 2016).

133. Research, L.G. Ultraportable Greenhouse Gas Analyzer (CH₄, CO₂, H₂O). Available online: <http://www.lgrinc.com/analyzers/ultraportable-greenhouse-gas-analyzer/> (accessed on 7 July 2016).

134. Melnyk, R.; Schrage, D.; Volovoi, V.; Jimenez, H. Sense and avoid requirements for unmanned aircraft systems using a target level of safety approach. *Risk Anal.* 2014, *34*, 1894–1906.

135. Smith, K.W. Drone technology: Benefits, risks, and legal considerations.

Seattle J. Environ. Law 2015, 5, 12.

136. Valavanis, K.; Vachtsevanos, G.J. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*; Springer: Berlin, Germany, 2011.

137. Cork, L.; Clothier, R.; Gonzalez, L.F.; Walker, R. The future of UAS: Standards, regulations, and operational experiences. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* 2007, 22, 29–45.

138. Clothier, R.A. Overview of Australian civil UAS regulations and supporting research. In Proceedings of the Technical Cooperation Panel Meeting AER (Aerospace Group), Technical Panel 6 “UAV Systems and Operations”, Fishermans Bend, Australia, 28 March 2012.

139. Croizé, P., Archez, M., Boisson, J., Roger, T., & Monsegu, V. (2015). Autonomous measurement drone for remote dangerous source location mapping. *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(5), 391. DOI: 10.7763/IJESD.2015.V6.624.

140. Malaver Rojas, J. A., Motta, N., Gonzalez, L. F., Corke, P., & Depari, A. (2012). Towards the development of a gas sensor system for monitoring pollutant gases in the low troposphere using small unmanned aerial vehicles.

141. Malaver, A., Motta, N., Corke, P., & Gonzalez, F. (2015). Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases. *Sensors*, 15(2), 4072-4096. DOI: 10.3390/s150204072.

142. Roldán, J. J., Joossen, G., Sanz, D., del Cerro, J., & Barrientos, A. (2015). Mini-UAV based sensory system for measuring environmental variables in greenhouses. *Sensors*, 15(2), 3334-3350.

143. Villa, T. F., Gonzalez, F., Miljievic, B., Ristovski, Z. D., & Morawska, L. (2016). An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives. *Sensors*, 16(7), 1072. DOI: 10.3390/s16071072.

144. Toxic Gas Sensor (Model : MQ-7) Manual [Электронный ресурс] – Режим доступа:

<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ7%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>

145. Quigley, Morgan, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, and Andrew Y. Ng. "ROS: an open-source Robot Operating System." In *ICRA workshop on open source software*, vol. 3, no. 3.2, p. 5. 2009.

146. GeoJSON [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <http://geojson.org/>

147. Github with code of the project [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: https://github.com/OlehQWERTY/QT_AR_Drone_App.git

148. OpenGL Overview [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.opengl.org/about/>

Наукове видання

Ткачук Андрій Геннадійович

Коваль Антон Валерійович

Гуменюк Анна Анатоліївна

Богдановський Мартін Віталійович

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ НАЯВНОСТІ
ШКІДЛИВИХ ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ НА ОСНОВІ
МІНІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

Монографія

Коректор
Комп'ютерний набір та верстка
Макетування

*О.О. Добржанський
М.С. Гриневич
М.С. Гриневич*

Формат 60x84 1/16. Папір офс.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 8,43.

Наклад 300 пр. Зам. № 57.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №7177 від 04.11.2020 р.
