

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем та програмної інженерії

(повна назва факультету)

Кафедра програмної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

Розробка скрипта для інтеграції складових елементів інерційної системи

з використанням технологій «ArduPilot»

Виконав: студент 6 курсу, групи СПмз-61

спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Таранін Б.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник _____
(підпис) Цебрій О.Р.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____
(підпис) Цебрій О.Р.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____
(підпис) Петрик М.Р.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2023

РЕФЕРАТ

Атестаційна робота магістра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, кафедра програмної інженерії, спеціальність 121 «Інженерія програмного забезпечення». ТНТУ, 2023. Сторінок 53, таблиць 1, рисунків 20, презентація.

Тема: Розробка скрипта для інтеграції складових елементів інерційної системи з використанням технологій ArduPilot.

В атестаційній роботі магістра висвітлено програмний код для системи з використанням апаратного забезпечення «Pixhawk» та програмного забезпечення «ArduPilot» для переключення з використання системи супутникової навігації на інерційну систему навігації при відсутності сигналів системи супутникової навігації та переключення з використання інерційної системи навігації на систему супутникової навігації при відновленні сигналів системи супутникової навігації, а також комплексування інерційної системи навігації. Було проведено інтеграцію розробленого скрипта в програмне забезпечення «ArduPilot», та виконано тестування роботи цього скрипта в системі з використанням апаратного забезпечення «Pixhawk». Тестування проводилось на основі аналізу даних з спеціального файлу для накопичення статичної інформації про події в системі (Logs). Результати тестування висвітленні у вигляді графіків з описом до них.

Ключові слова: інерційна система, супутникова навігація, ArduPilot, Pixhawk

ABSTRACT

Master's certification work. Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Department of Software Engineering, specialty 121 "Software Engineering". TNTU, 2023. Pages 50, tables 1, figures 20, presentation

Topic: Development of a script for integrating the components of an inertial system using ArduPilot technologies.

The master's thesis highlights the program code for the system using Pixhawk hardware and ArduPilot software to switch from using the satellite navigation system to the inertial navigation system in the absence of satellite navigation system signals and switching from using the inertial navigation system to the satellite navigation system when the satellite navigation system signals are restored, as well as integrating the inertial navigation system. The developed script was integrated into the ArduPilot software and tested in the system using Pixhawk hardware. The testing was based on the analysis of data from a special file for accumulating static information about events in the system (Logs). The test results are presented in the form of graphs with descriptions.

Keywords: inertial system, satellite navigation, ArduPilot, Pixhawk

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ANNOTATION	5
ЗМІСТ	6
Вступ	7
1 Огляд предметної області	9
1.1 Огляд конкурентів	14
1.2 Обґрунтування вибору напрямку дослідження.....	16
1.3 Технічний аспект проблеми використання системи супутникової та інерційної навігацій.....	22
2 Розробка моделі та програмного комплексу.....	35
2.1 Проектування та розробка програмного коду.....	36
2.2 Тестування скрипта та оцінка якості.....	41
2.3 Результат розробки скрипта.....	47
3 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	48
3.1 Охорона праці оператора ЕОМ.....	49
3.2. Охорона праці під час воєнного стану.....	50
Висновки.....	53
Перелік посилань	54
Додатки	56

ВСТУП

В теперішній час все більше систем використовують технології глобального позиціонування та навігації. Ці технології тісно переплітаються в нашому житті полегшуючи його, а в деяких випадках є не заміним інструментом в повсякденній життєдіяльності. Від геолокації у вашому смартфоні, що може вказати потрібне вам місце та оптимальний маршрут до нього до автоматизованих систем та роботів на об'єктах інфраструктури великих компаній, таких як Amazon, Tesla, Siemens. Технології глобального позиціонування та навігації поширились на всі сфери людської діяльності на планеті та за її межами. Найширше застосування ці технологій отримали серед безпілотних апаратів, вони забезпечує точність і ефективність роботи цих апаратів. Безпілотні апарати працюють в умовах, що можуть бути небезпечні для людини, на землі, у повітрі, у воді, вони замінюють дорогі технології дешевшими та можуть працювати автономно протягом довгого часу. Починаючи від передачі посилок, товарів, їжі, доставки вантажів у важкодоступні місця та під час складних метеорологічних умов до здійснення наукових досліджень на поверхні Марсу та на дні океанів на Землі.

Розвиток безпілотних апаратів потребує постійного удосконалення та покращення технологій глобального позиціонування та навігації, як в апаратному так і в програмному відношенні для їх стійкості та точності роботи в будь яких умовах застосування. Одним з таких оптимальних рішень є інтеграція системи супутникової навігації та системи інерційної навігації. Система супутникової навігації є дуже точною і ця точність може складати декілька сантиметрів але це – система космічного та наземного устаткування, яке знаходиться не на борту безпілотного апарату безпосередньо, а за його межами, тому ця точність нівелюється в місцях де відсутні сигнали системи супутникової навігації. З іншої сторони система інерційної навігації має все необхідне для автономної роботи на борту безпілотного апарату, окрім достатньої точності у вимірюваннях. Таке слабке місце як точність, спричинене кумулятивною похибкою – сумарною

похибкою приладів та датчиків системи інерційної навігації під час тривалого використання, не дає змогу їй панувати в «екосистемі» технологій глобального позиціонування та навігації.

В цій роботі розроблено та протестовано програмний код, що забезпечує взаємодію між системами супутникової та інерційної навігації. Розроблений скрипт дає можливість поєднати точність системи супутникової навігації та незалежність системи інерційної навігації, тобто в основі лежить використання системи супутникової навігації, а при відсутності сигналів супутникової навігації – системи інерційної навігації. Стек цих систем забезпечить стійку та точну навігацію безпілотних апаратів, що розширить їх спектр застосування.

1. ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

Навігація - галузь знань про керування механічним засобом для спрямування його до визначеної кінцевої точки за визначеним маршрутом у різних середовищах: наземному, повітряному, водному, а також в космічному просторі. Під механічними засобами у визначені поняття «Навігація» розуміється будь-який механічний засіб здатний здійснювати кероване переміщення, рух за визначеним маршрутом до кінцевої точки в різних середовищах. Кероване переміщення, рух механічних засобів здійснюється переважно трьома основними способами:

- безпосередньо людиною з механічного засобу;
- людиною з віддаленої станції керування;
- автономно механічним засобом за раніше закладеним алгоритмом.

Основні задачі навігації полягають у забезпеченні точного, своєчасного та безпечного руху (переміщення) засобів у будь-якому середовищі, виконанні необхідних розрахунків для здійснення маневрів. До навігації також потрібно віднести засоби визначення координат, вимірювання напрямку руху та відстані у середовищі, вирахування шляху засобу, визначення його положення в середовищі, оцінка похибок.

Система навігації - комплексна електронно-технічна система, яка складається із сукупності наземного, водного та космічного устаткування, призначена для визначення точного місця розташування (географічних координат і висоти) і часу, а також параметрів руху (швидкості і напрямку руху, прискорення) для наземних, водних, повітряних, космічних механічних засобів.

Основні види навігаційних систем:

Авіаційна навігаційна система - це система навігації призначена для використання механічними засобами повітряного типу.

Наземна навігаційна система - це система навігації призначена для використання в механічних засобах наземного типу.

Морська (водна) навігаційна система - це система навігації призначена для використання в механічних засобах водного та підводного типів.

Космічна навігаційна система - це система навігації призначена для використання в механічних засобах космічного типів.

Незалежно від сфери застосування всі навігаційні системи мають відповідати основним вимогам:

- Цілісність.
- Безперервність роботи.
- Точність у визначенні вхідних даних від устаткування механічного засобу (швидкості пересування засобу, часу і координат місцезнаходження);
- Організаційна, просторова й тимчасова доступність.

Навігаційна система в залежності від типу механічного засобу може використовувати прилади, які знаходяться в самому засобі так і за допомогою додаткових приладів використовувати зовнішні системи, комплекси.

Основні прилади та устаткування навігаційної системи, що може знаходитись в механічному засобі та забезпечує ефективність навігаційної системи :

- Супутникові навігаційні системи - система наземного та космічного устаткування, призначена для позиціонування в просторі та часі, а також для визначення швидкості, напрямку та інших параметрів руху механічних засобів різного типу, заснована на позиціонуванні об'єкту відносно супутників на орбіті планети.
- Наземні станції навігації – комплекс наземних вишок та устаткування призначена для позиціонування в просторі та часі, а також для визначення швидкості, напрямку та інших параметрів руху механічних засобів різного типу, заснована на позиціонуванні об'єкту відносно наземних вишок, станцій на поверхні планети. Може бути, як автономна система, так і допоміжний елемент для супутникових навігаційних систем для точнішого позиціонування механічних об'єктів.
- Карти місцевості, супутникові знімки, карти висот тощо.

- Магнітний компас — прилад, використовуючи магнітне поле Землі дозволяє визначити приблизний напрямок на магнітний полюс планети.
- Гірокомпас – гіроскопічний прилад, що дозволяє визначити курс відносно певного меридіана, на який він налаштований.
- Радіокомпас – пристрій, що дозволяє визначити курс на широкомовну або спеціальну привідну радіостанцію.
- Радіолокатор (радар, радіолокаційна станція) — радіоприймач, що дозволяє за допомогою радіохвиль виявляти інші об'єкти, які відбивають радіохвилі (елементи рельєфу, інші об'єкти (в тому числі тварини, рослини) та механічні засоби у повітряному, наземному, космічному середовищі).
- Гідролокатор (сонар) — прилад, схожий за принципом дії на радіолокатор, але використовує замість радіохвиль акустичне випромінювання і призначений для виявлення елементів рельєфу, інших об'єктів (в тому числі тварин) та механічних засобів у водному середовищі.
- Доплерівський вимірювач — прилад, принцип дії якого заснований на ефекті Доплера, дозволяє визначити швидкість, напрямок руху об'єктів;
- Висотомір (барометр) – пристрій, який за допомогою зовнішнього тиску дозволяє визначити висоту польоту для механічних засобів повітряного типу, висоту рельєфу для механічних засобів наземного типу.
- Глибиномір (манометр) – пристрій, схожий за принципом дії з барометром, дозволяє визначити висоту занурення для механічних засобів водного типу.
- Радіодалекомір і радіовисотомір — прилад для вимірювання відстань до певного об'єкта, та вертикальну відстань до поверхні планети за допомогою радіохвиль.
- Акселерометр – прилад для вимірювання прискорення та перевантажень механічного засобу під час руху в середовищі.
- Лідар (лазерний далекомір) - прилад, схожий за принципом дії з радіодалекоміром для вимірювання відстані до певного об'єкту за допомогою світлового променя (лазера).

- Трубка Піто - прилад для вимірювання динамічного тиску потоку рідини або газу.
- Трубка Прандля – удосконалена трубка Піто, що дозволяє вимірювати статичний та динамічні тиски.
- Також інші пристрої, які використовуються, як додаткові елементи навігаційної системи, такі як наприклад регулятори обертів двигуна чи позиціонування відносно інших механічних засобів.

Прилади навігаційної системи, відповідне програмне та апаратне забезпечення дозволяють здійснювати рух механічних засобів з віддалених станцій керування та автономно за раніше записаним алгоритмом, маршрутом, місією.

Таким програмним забезпеченням є ArduPilot. ArduPilot – це програмне забезпечення з відкритим кодом, яке працює з широким діапазоном апаратного забезпечення. Враховуючи, що ArduPilot - це відкрите програмне забезпечення, воно використовується звичайними користувачами та в комерційних цілях, що дає змогу постійно розвивати та вдосконалювати програмний продукт.

Спектр налаштування апаратного забезпечення за допомогою програмного забезпечення ArduPilot дозволяє працювати безпілотними механічними засобами наземного, повітряного, водного типу використовуючи різне устаткування та прилади навігаційної системи в залежності від типу засобу.

Основні елементи технології ArduPilot:

Апаратне забезпечення механічного засобу, що включає:

- Контролер - призначений для збору і обробки вхідних даних від приладів, устаткування навігаційної системи, механічних частин засобу та керування механічними частинами засобу відповідно до запланованої місії на основі заданого коду та параметрів, використовується одного типу для різних типів механічних засобів.
- Прилади та устаткування навігаційної системи та датчики – призначені для передачі даних на контролер необхідних для виконання місії. В залежності від вимог до механічних засобів та призначення прилади та устаткування навігаційної системи можуть використовуватись різні.

- Механічні частини – призначенні для керування механічним засобом на основі команд з контролера. Це можуть бути сервоприводи різного типу, двигуни тощо.

Програмне забезпечення механічного засобу - це код який виконується на контролері відповідно до типу засобу та заданих параметрів для виконання запланованої місії.

Наземна станція керування – програмне забезпечення, що являється інтерфейсом для контролера. Призначена для програмування, налаштування, контролера, керування механічним засобом, планування місій та здійснення аналізу після виконання місії. Також дозволяє здійснити аналіз у разі нештатних ситуації під час місії.

Типи засобів з якими сумісні технології ArduPilot:

Повітряний, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) - включає безпілотні літальні апарати літакового (fixed-wing, з ситемою VTOL – Vertical Takeoff and Landing, конвертоплани та інші) багатороторного (квадрокоптери, гексакоптери, октокоптери, трикоптери), гелікоптерного типу та дирижаблі.

Наземний, UGV (Unmanned Ground Vehicles) - включає наземні безпілотні апарати такі, як роботизовані автомобілі, марсоходи, сільськогосподарські засоби, спеціальні засоби колісного та гусеничного тип.

Водний - включає безпілотні апарати надводного типу такі, як катера, човни, невеликі судна, підводного типу – міні-субмарини, а також спеціальні водні засоби – підводні роботи .

Важливо враховувати, що для кожного конкретного типу безпілотного засобу потрібне відповідне апаратний та програмний забезпечення, а також правильно налаштовані параметри ArduPilot відповідно до потреб та характеристик засобу.

1.1. Огляд конкурентів

На теперішній час є декілька альтернатив ArduPilot, найпопулярніші серед яких PX4, DJI NAZA, OpenPilot, Paparazzi UAV, ROS (Robot Operating System) – це програмне забезпечення з відкритим кодом, яке може працювати з різним апаратним забезпеченням. При виборі фрейворка потрібно розуміти вимоги та потреби безпілотних засобів.

Найчастіше ArduPilot (Рис. 1.1) порівнюють з PX4 (Рис. 2.1) і ось чому. PX4 - це відкрите програмне забезпечення для автопілотів, розроблене для керування безпілотними апаратами. PX4 базується на відкритому вихідному коді та підтримує різні апаратні платформи, що дозволяє використовувати його на різних типах літальних апаратів, наземних та водних засобах. PX4 дозволяє налаштовувати різні параметри і програмувати складні маршрути та місії для виконання широкого спектру завдань. Він підтримує супутникову навігацію, також використовує додаткові датчики для визначення точного положення та орієнтування. PX4 активно користується міжнародною спільнотою розробників, тому програмне забезпечення постійно вдосконалюється. Розробка ведеться на GitHub, тому кожен може прийняти участь у розробці програмного, а також адаптувати його під свої певні задачі.



Рис 1.1 - Логотип програмного забезпечення ArduPilot



Рис 1.2 - Логотип програмного забезпечення PX4

Обговоримо основні переваги та недоліки програмного забезпечення PX4 та ArduPilot.

До переваг PX4 можна віднести:

- Гнучку архітектуру, що дозволяє додавати нові функції та адаптувати його під певні потреби.
- Підтримка різних апаратних платформ, що спрощує пошуки необхідного апаратного забезпечення для специфічних завдань.
- Використовує сучасні технології, що полегшує інтеграцію та взаємодію з іншим апаратним забезпеченням, як наприклад MAVLink – відкритий протокол зв'язку.

До переваг ArduPilot можна віднести:

- Простіший у використанні та потребує менше часу та зусиль для навчання.
- Має більший функціональний спектр та більше опцій для програмування, що дозволяє виконувати більш специфічні завдання.
- Має велику та активну спільноту, що сприяє швидкому вирішені проблем як для новачків так і для користувачів з досвідом.

До недоліків PX4 відноситься:

- Не зважаючи на гнучкість архітектури функціональність може бути менша в певних аспектах порівняно з ArduPilot.

- Вивчення PX4 може вимагати більше часу та зусиль порівняно з іншими фреймворками, що іноді є критичним для новачків у сфері безпілотних апаратів.

До недоліків ArduPilot відноситься:

- ArduPilot використовує менш сучасні технології порівняно з PX4.
- У порівнянні з PX4 архітектура менш гнучка та менші можливості для розширення.

Висновок: програмне забезпечення ArduPilot і PX4 дуже схожі за призначенням та функціоналом, але враховуючи, що ArduPilot потребує менше часу та ресурсів для навчання, а також велику популярність та підтримку серед схожих видів програмного забезпечення в тому числі PX4, то перевагу для більшості новачків потрібно віддати ArduPilot. Але для досвідчених користувачів вибір між ArduPilot і PX4 буде залежати від технічного завдання, вимог та потреб користувачів продукту, що розробляється.

Враховуючи викладену інформацію в рамках виконання даної роботи було обрано програмне забезпечення ArduPilot.

1.2 Обґрунтування вибору напрямку дослідження

В ArduPilot використовуються в основному дві мови програмування – C++, як основна і Python, як допоміжна мови програмування .

C++ - це кросплатформна мова програмування загального призначення з підтримкою кількох парадигм програмування: об'єктно-орієнтованої, узагальненої, процедурної.

Програмне забезпечення ArduPilot розроблене в основному на мові програмування C++, тобто ця мова є основною мовою програмування для

написання коду для основних компонентів ArduPilot, таких як система керування, алгоритми стабілізації та автономного польоту, режими системи та інші ключові частини програмного забезпечення. Враховуючи обмеженні ресурси бортових комп'ютерів безпілотних апаратів, C++ - найбільш ефективніше рішення.

Коротко про історію створення та розвитку мови програмування C++. У 1979 році Бьярн Страуструп почав розробку нової мови програмування на базі мови C в лабораторії AT&T Bell Laboratories (Мюррей Хілл, Нью-Джерсі). Ця мова отримала назву "C with Classes" (C з класами). У 1984 році мова програмування була переіменована з C with Classes на C++ , в 1985 році вийшов перший компілятор C++.

В подальшому Бьярн Страуструп та інші розробники вдосконалювали та додавали нові можливості в C++. Так у 1989 році вийшов стандарт C++ 2.0 із оновленнями та покращеннями.

У 1990-х роках C++ стала однією з найпоширеніших мов програмування загального призначення. Її використовують для системного програмування, розробки прикладного програмного забезпечення, написання драйверів, потужних серверних, а також для розробки розважальних програм.

У 1998 році затверджено стандарт C++98 (ISO/IEC 14882:1998 C++).

У 2003 році затверджено стандарт C++03 (ISO/IEC 14882:2003 C++).

У 2011 році стався один з важливих кроків у розвитку C++ було введено новий стандарт C++11. Цей стандарт порівняно з попередніми мав багато поліпшень та нововведень, таких як автоматична ініціалізація, розширені можливості шаблонів та інші.

У 2017 році затверджено стандарт C++17 (ISO/IEC 14882:2017 C++). Основні зміни стандарту : додано декілька нових бібліотек, алгоритмів, та класів до STL, поліпшено роботу з лямбда-виразами, оновлено бібліотеку для мультипоточного програмування.

У 2020 році затверджено стандарт C++20 (ISO/IEC 14882:2020 C++). Цей стандарт порівняно з попередніми C++14 і C++17 зазнав більше нововведень та змін.

Обговорімо переваги та недоліки мови програмування C++. До переваг можливо віднести:

- Швидкодія: код, написаний на C++, може ефективно виконуватися та оптимізуватися, що робить його популярним в областях, де важлива продуктивність. Швидкість роботи програм на C++ практично не поступається програмам на C.
- Низькорівневий доступ: надає низькорівневий доступ до пам'яті та ресурсів системи, що корисно для системного програмування та розробки вбудованих систем.
- Ефективність: написання на мові програмування C++ є оптимальним рішенням у випадках обмеженого використання програмним забезпеченням ресурсів таких, як пам'ять, центральний процесор, енергія та інші. Одним з таких випадків є програмне забезпечення для контролера безпілотних апаратів.
- Масштабованість: C++ мультиплатформна мова програмування, тому програмне забезпечення може розроблятися для найрізноманітніших платформ і систем, які варіюються за розміром від декількох до сотні тисяч рядочків коду.
- Велика різноманітність бібліотек C++ надає розробникам доступ до великої кількості готових рішень та інструментів, що значно полегшує розробку.

Щодо недоліків мови програмування C++, до основних можна віднести:

- Складність та обсяг коду: C++ може бути більш складним для вивчення та використання ніж інші мовами програмування, особливо для початківців, хоча з кожним новим стандартом C++ покращується і стає легшою в сприйнятті. Але не зважаючи на покращення стандартів, код на мові C++ має більший обсяг порівняно з іншими мовами.
- Можливість помилок: більшість помилок C++ успадкував від C, існує безліч можливостей допущення помилки, яку в подальшому буде важко виявити та усунути. Щоб цього уникнути потрібно дотримуватись певних, своєрідних

правил написання коду, що певним чином обмежує написання програмного забезпечення.

- Відсутність автоматичного управління пам'яттю, це призводить до проблем із переповненням буфера та витоком пам'яті, якщо необхідно вручну вивільнювати пам'ять.
- Програмна «уніфікація»: C++ позиціонувалась є платформонезалежною мовою, але все таки є можливість того, що код, написаний для однієї платформи, зможе не працювати без модифікацій на інших.
- Час розробки програмного забезпечення: написання коду та тестування програмного забезпечення на мові C++ може потребувати більше часу ніж такий же обсяг на інших мовах програмування.

На теперішній час C++ залишається однією з найпопулярніших мов програмування, використовується в різних областях та проектах, і її стандарт постійно вдосконалюється, доповнюючи мову новими можливостями. Згідно рейтингом IEEE Spectrum в 2023 році C++ входить до топ 5 у категорії найпопулярніших мов програмування серед ІТ-спеціалістів серед яких мови програмування: Python, Java, C, JavaScript [4]. IEEE Spectrum – щомісячний журнал, який видається Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки та має велику аудиторію читачів, являється одним з провідних наукових і технічних журналів у світі.

В Україні за результатами проведеного опитування на сайті найбільшої спільноти розробників України - DOU (Developers of Ukraine) C++ посідає 8 місце серед популярних мов програмування в Україні [5].

Але виникає питання чому саме C++ використовується в основі ArduPilot? Не зважаючи на недоліки C++ ця мова програмування володіє якостями критично важливими для роботи програмного забезпечення з апаратним забезпеченням такого, як контролер безпілотних апаратів, а саме :

- Висока швидкість виконання коду, що є великою перевагою враховуючи менший час реагування для автопілота на зміни у середовищі та здійснення керування безпілотним апаратом.

- Низькорівневий доступ до пам'яті та інших ресурсів системи. Це важлива властивість при роботі з автопілотними систем, адже потрібне точне та ефективне управління ресурсами особливо при обмежені цих ресурсів.
- C++ досить популярна мова програмування відповідно має велику спільноту розробників, що сприяє у швидкому вирішенні проблем та підтримці в тому числі при програмуванні налаштуванні ArduPilot.
- Програмне забезпечення деяких пристроїв, додатків та систем використовує C++ відповідно це дозволяє інтегрувати ArduPilot з іншими технологіями та платформами.

Як висновок можна сказати, що головними аргументами вибору мови програмування C++ для розробки ArduPilot є забезпечення високої продуктивності, ефективності на гнучкості програмного забезпечення при обмеженій пам'яті та ресурсах апаратної частини автопілота, а також підтримка великої аудиторії даної мови програмування, що сприяє швидкому рішенню проблем та можливість інтеграції з іншими платформами та технологіями.

Ще одна мова яка частіше за все використовується в ArduPilot – це Python. Основний напрямок застосування в ArduPilot – це розробка наземних станцій керування, сценаріїв автоматизації, аналізу даних та інших завдань. Python надає зручний інтерфейс для взаємодії з системою в ArduPilot та швидкий розвиток різноманітних інструментів.

Python - це високорівнева, інтерпретована мова програмування загального призначення. Використовується, як допоміжна мова програмування при роботі з технологіями ArduPilot.

Коротко про історію створення та розвитку мови програмування Python.

в кінці 1980 років розпочалась розробка мови Python, програмістом Гвідо ван Россумом співробітником голландського інституту Centrum Wiskunde & Informatica (CWI). Перша версія Python (1.0) яка стабільно працювала вийшла у січні 1994 року. Python мав деякі з основних рис, що визначають мову програмування, такі як об'єктно-орієнтоване програмування та модульність. Було запозичено багато рис таких мов програмування , як C, C++, Lips.

У 2000 році був введений Python Enhancement Proposal (PEP) — механізм для внесення пропозицій щодо розвитку мови. Це зробило більш систематичний підхід до прийняття рішень в спільноті Python. Саме наявність дружньої спільноти користувачів та дизайнерська інтуїція Гвідо ван Россума стали рушійними силами в розвитку та успіху мови програмування Python.

У 2008 році вийшла версія Python 3.0 (іноді вказується як Python 3000 або просто Python 3). Розробка даної версії супроводжувалась тривалим тестуванням та як, результат мало значні оновлення, такі як численні зміни у синтаксисі та внутрішній архітектурі, це вплинуло на поліпшення якості та ефективності. Але протягом довгого часу паралельно існувала старіша версія Python 2 та отримувати підтримку з метою поступового переходу спільноту на версію Python 3. З 2020 року Python 2 більше не підтримується, і рекомендується використовувати Python 3 для всіх нових проєктів. На Терперішній час версія Python 3 активно розвивається та покращується, секрет успіху полягає в простоті використання та потужному функціоналі. Як згадувалося раніше за версією IEEE Spectrum в 2023 році Python очолює рейтинг найпопулярніших мов програмування серед ІТ-спеціалістів у світі серед 59 мов програмування[4].

В Україні за результатами проведеного опитування на сайті найбільшої спільноти розробників України - DOU (Developers of Ukraine) Python посідає 3 місце серед популярних мов програмування в Україні уступаючи тільки таким мовам як JavaScript та Java [5].

Виникає питання чому Python наскільки популярний у роботі з ArduPilot, а також роль та місце його в програмному забезпеченні ?

Частіше всього Python використовується для розробки та адаптації програмного забезпечення наземних станцій керування (Ground Control Stations, GCS) та взаємодії безпілотними апаратами різних типів. Це надає можливість оператору безпілотного апарату здійснювати моніторинг, керування, планування та виконання місії, здійснені аналізу поведінки апарату.

Також Python використовується для написання сценаріїв та автоматизації різних завдань в ArduPilot в залежності від вимог та потреб безпілотного апарату.

Це може бути як автоматизоване тестування, обробку даних, генерацію місій та налаштування параметрів.

Простота використання Python дозволяє розробникам швидко створювати розширення для ArduPilot, додавати нові модулі та функціонал, що сприяє легшому розширенню системи.

Ще одним вагомим варіантом застосування Python являється створення сценаріїв симуляції та тестування систем ArduPilot, це дозволяє виконувати віртуальні тести та аналізувати реакцію системи в різних умовах. Найефективніший спосіб виявити дефекти програмного та апаратного забезпечення на ранніх стадіях розробки, що може суттєво зекономити ресурси на розробку продукції. Також симуляція це є незамінний інструмент у навчанні людей, що мінімізує наслідки помилок порівняно з роботою на справжніх безпілотних апаратах.

Враховуючи вище викладене можна зробити висновок, стек мов програмування C++ та Python є безумовно симбіозом найкращого рішення при роботі з технологіями ArduPilot. Набір переваг та особливостей цих мов програмування дають змогу швидко та якісно взаємодіяти при розробці програмного забезпечення для широкого спектру завдань, вимог та потреб безпілотних апаратів та різних технологій, які застосовуються в них.

В даній роботі програмний код розроблявся мовою програмування C++ для безпілотного літального апарату літакового типу.

1.3 Технічний аспект проблеми використання системи супутникової та інерційної навігації.

Технології ArduPilot можуть використовуватись для різних типів безпілотних апаратів, але найбільший набір налаштувань використовується для безпілотних

літальних апаратів. Враховуючи набір програмного та апаратного забезпечення безпілотні літальні апарати є найбільш складними у своїй структурі порівняно з простими моделями безпілотних засобів наземного та водного типу.

Розробка безпілотних літальних апаратів потребує якісної апаратного складової, а також – програмної, для ефективної інтеграції та відповідності вимогам користувача.

Розберемо будову безпілотного літального апарату літакового типу для загального розуміння принципів роботи системи супутникової та інерційної навігацій.

Почнемо з складових безпілотного літального апарату на прикладі безпілотного засобу літакового типу. Воно може включати велику кількість різних компонентів залежно від типу, призначення та характеристик конкретного апарату. Однак до основних компонентів безпілотного літального апарату входить:

Корпус - являє собою каркас в якому або на якому розміщуються всі інші компоненти безпілотного літального апарату. Виготовляється з легких та міцних матеріалів, таких як карбонові волокна або алюмінієва сплав, композитні матеріали, деревина та інше. Існує кілька видів безпілотних літальних апаратів літакового типу відповідно до будови корпусу, а саме:

- класичний літак (Рис. 1.3)
- типу крило (Рис. 1.4),
- з системою VTOL (Vertical Takeoff and Landing)(Рис.5),
- конвертоплан (Рис.6), біплан та інші.



Рис 1.3 Безпілотний літальний апарат WARMATE-R, компанії WB Group [6]

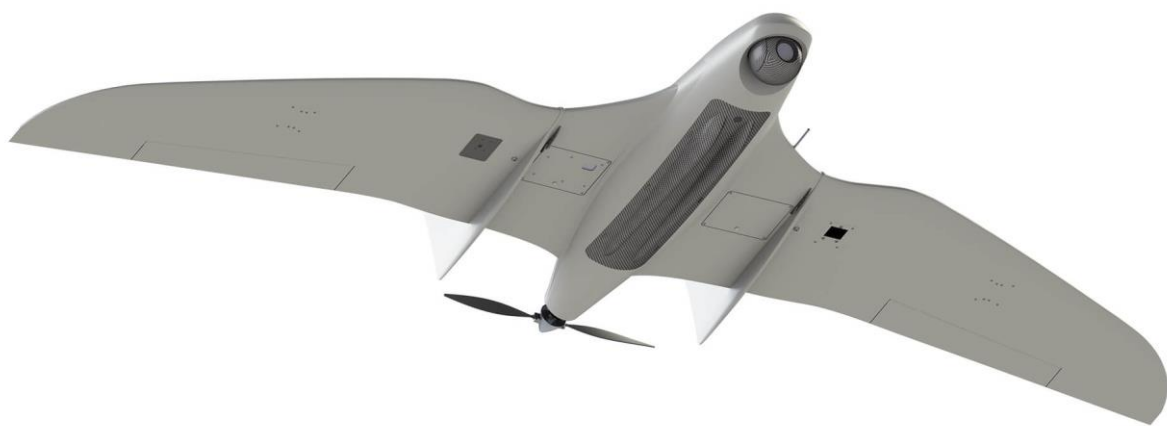


Рис 1.4 Безпілотний літальний апарат А1-СМ «ФУРІЯ», компанії АТЛОН [7]

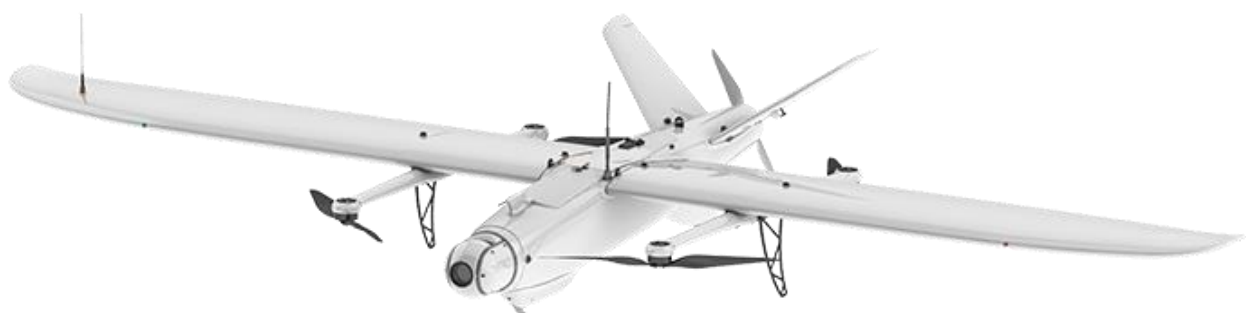


Рис 1.5 Безпілотний літальний апарат CICONIA з системою VTOL, компанії DeViRo [8]



Рис 1.6 Безпілотний літальний апарат Vector, компанії QUANTOMSYSTEMS [9]

Розглянемо будову безпілотного апарату на прикладі класичного літака:

Фюзеляж, тіло безпілотного апарату - основна частина засобу в якій с основному розміщується електричні та електронні системи, системи керування та оптимізації, силова установка, система живлення силової установки, також до фюзеляжу приєднані інші елементи корпусу такі, як крило та хвостова частина.

Крило з рухомими поверхнями (елерони, центроплани) – частина корпусу безпілотного літального апарату що генерує підйомну силу, необхідну для підняття борта в повітря, його утримання під час виконання місії та безпечного приземлення, а також зміни висоти та напрямку переміщення в повітрі. Крило може

бути прямокутним, трапецієподібним або іншої форми в залежності від типу літака. Керування та стабілізація безпілотного літального апарату здійснюється рухомими поверхнями.

Хвостова частина – включає вертикальний та/або горизонтальний стабілізатори. Вертикальний стабілізатор допомагає утримувати літак стабільним в поздовжньому напрямку, горизонтальний стабілізатор (кермо висоти) - в поперечному.

Силова установка, являє собою двигун з пропелерами для забезпечення необхідної тяги, підняття борта в повітря, його утримання, зміни швидкості (в деяких випадках зміна висоти польоту) під час виконання місії та безпечного приземлення. Двигун може бути електричного та внутрішнього згорання. Розміщення може бути, як на крилах так і на фюзеляжі.

Система живлення силової установки, електронних та електричних систем призначена для живлення двигунів та електронних та електричних систем безпілотного літального апарату для електричних двигунів – це акумуляторна батарея, для двигунів внутрішнього згорання – баки з паливом та паливна система та додаткова акумуляторна батарея. Варіанти розміщення різні, як в/на фюзеляжі так і в на крилах.

Системи керування та оптимізації включають призначені для керування безпілотним літальним апаратом на основі збору, обробки вхідних даних та команд з наземної станції керування, включають в себе системи автоматичного керування, навігації, автопілоти (польотні контролери), приймачі супутникової навігаційної системи, датчики та прилади інерційної системи навігації тощо.

Електронні та електричні системи живлення - системи для взаємодії оператора з безпілотним літальним апаратом, системи комунікацій, вбудовані комп'ютери та інше.

Також в залежності від призначення безпілотного літального апарату типу зльоту і посадки може бути інше устаткування таке, як оптичні засоби, шасі тощо.

Схема будови безпілотного літального апарату літакового типу класичної форми з хвостовою частиною V подібної форми.

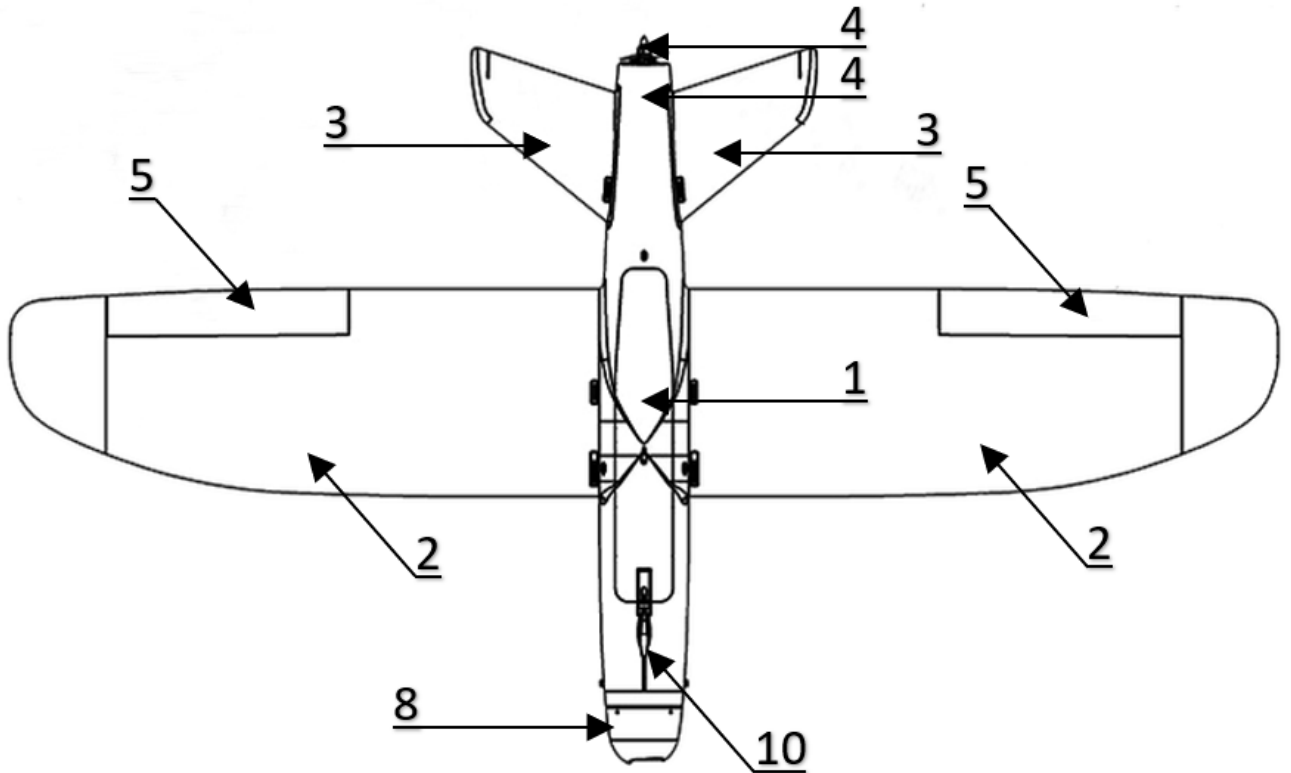


Рис 1.7 Основні елементи безпілотного літального апарату літакового типу.
Вигляд зверху.

1. Корпус безпілотного літального апарату;
2. Крило;
3. Хвостова частина;
4. Силова установка з пропелерами;
5. Елерон (рухомі поверхні);

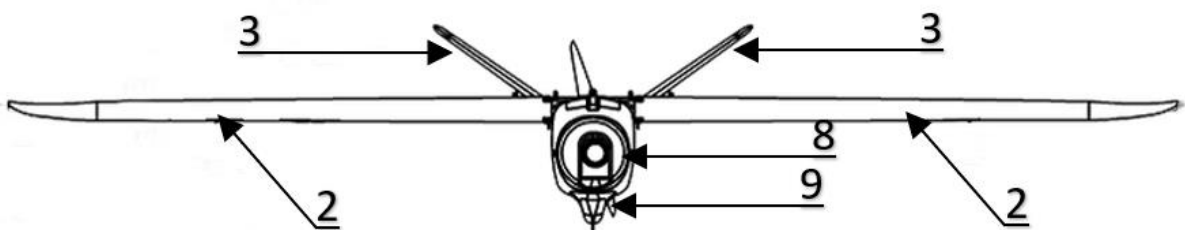


Рис 1.8 Основні елементи безпілотного літального апарату літакового типу.
Вигляд спереду.

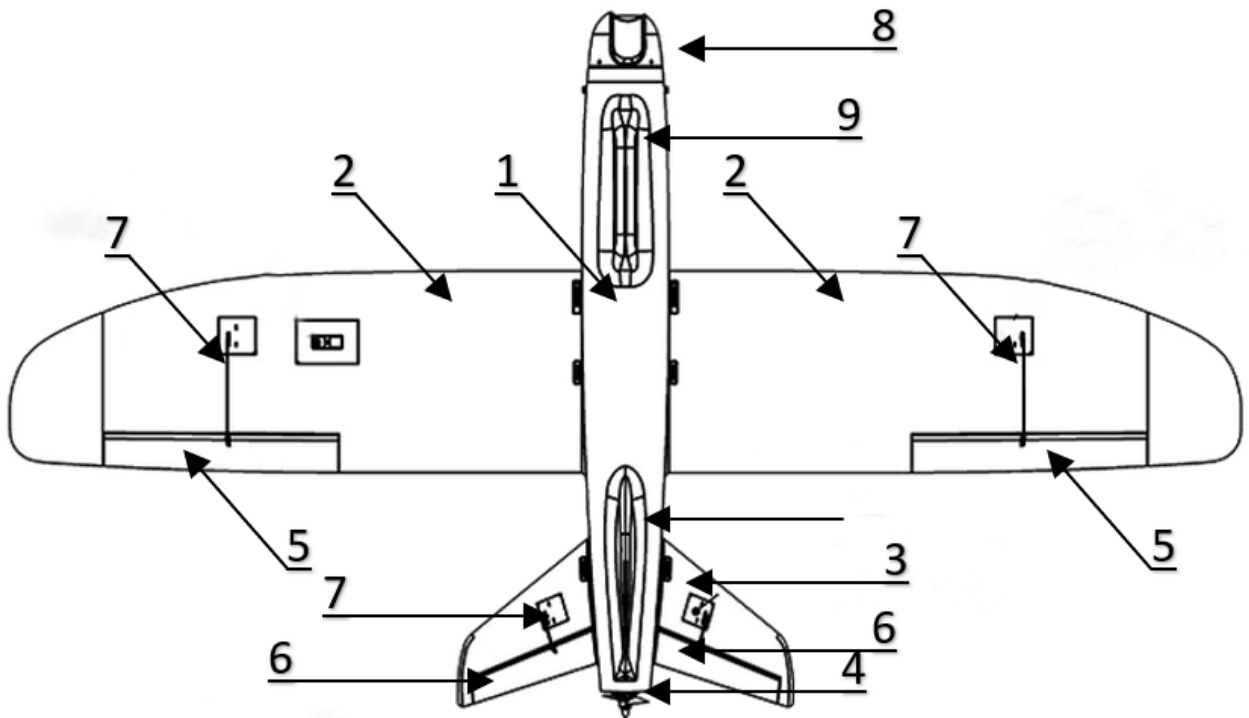


Рис 1.9 Основні елементи безпілотного літального апарату літакового типу.
Вигляд знизу.

- 6. Руліватор (рухомі поверхні);
- 7. Сервоприводи рухомих поверхонь;
- 8. Цільове навантаження (оптичні пристрої тощо);
- 9. Шасі;
- 10. Трубка Піто (Прандля).

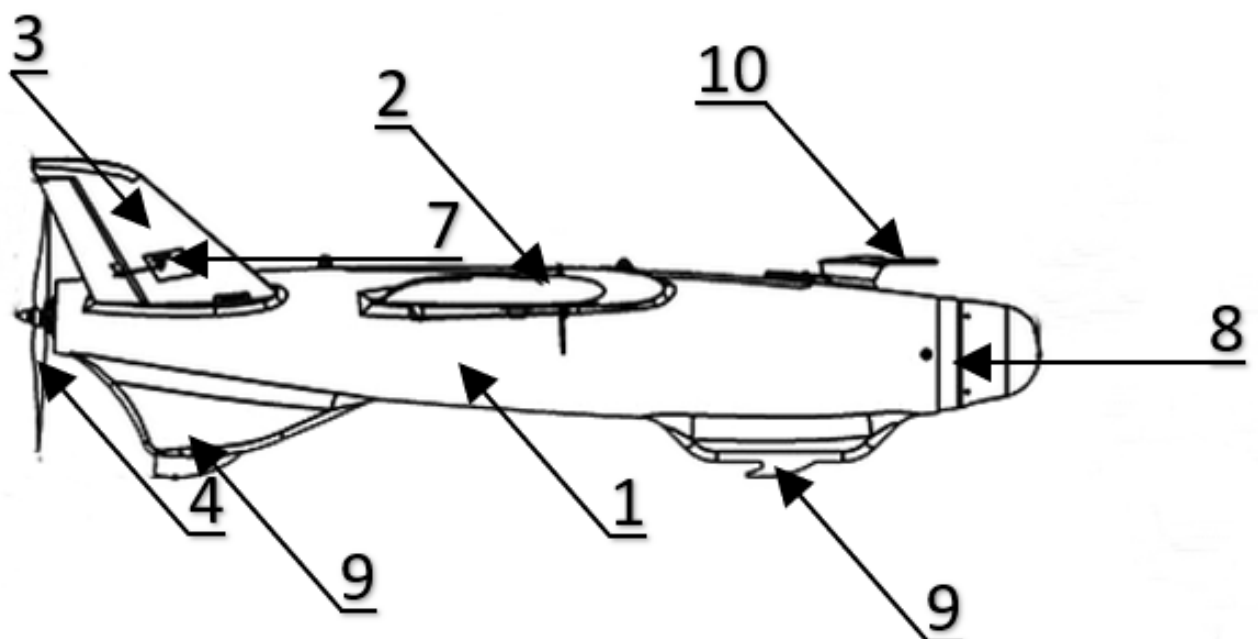


Рис 1.10 Основні елементи безпілотного літального апарату літакового типу.
Вигляд збоку.

Наземна станція керування – комплекс пристроїв, які забезпечують здійснення керування безпілотного апарату, моніторинг про стан борта, включаючи параметри польоту, стан систем, дані сенсорів, іншу інформацію. Наземна станція керування в основному включає в себе:

Електронну обчислювальну машину, яка може працювати на платформах Microsoft Windows, Linux, MacOS, Android.

Програмне забезпечення, таке, як QGround Control, Mission Planner тощо.

Приймально передавальний пристрій (антени) для комунікації і взаємодії з безпілотним апаратом.

Додатково може бути пульт дистанційного керування та інше обладнання за необхідності.

Для даної роботи використовувалось програмне забезпечення Mission Planner версії 1.3.80. для роботи з безпілотним апаратом (Рис 1.11 та Рис 1.12).

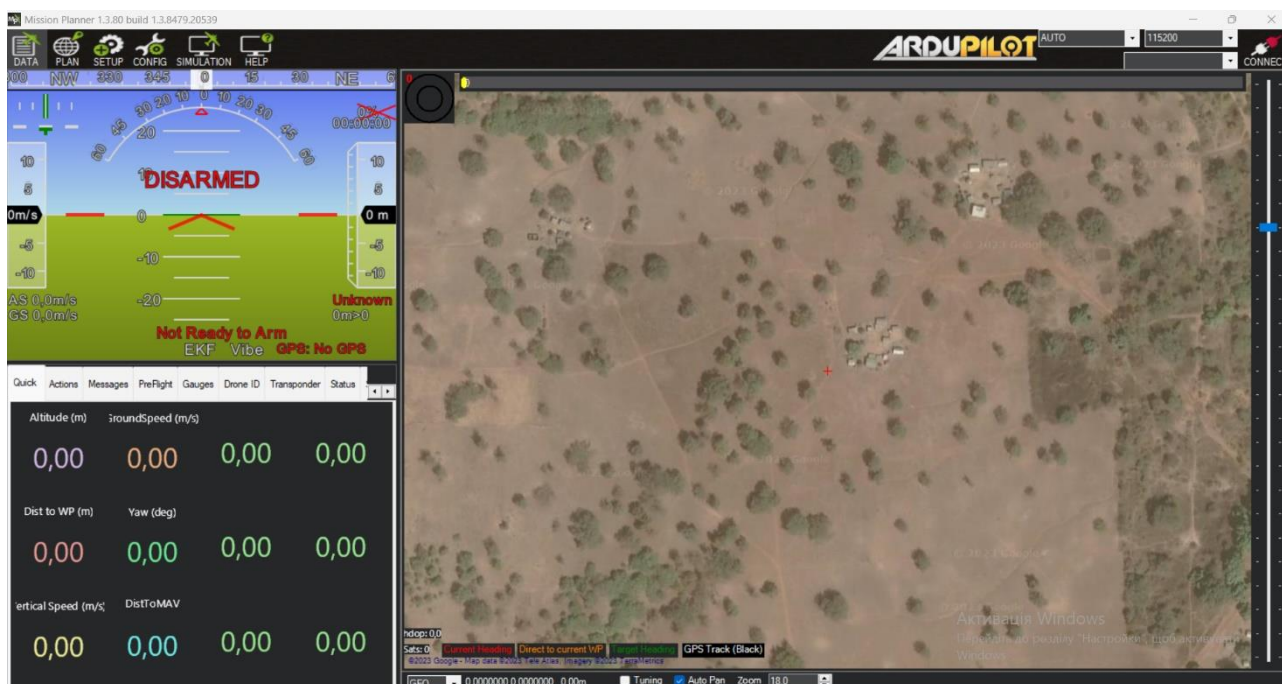


Рис 1.12 Програмне забезпечення Mission Planner версії 1.3.80.
Вкладка «Дані».

У вкладці даних відображаються параметри та стан систем безпілотного літального апарату в тому числі систем супутникової та інерційної навігації, позиціонування борта на карті за допомогою цих систем.



Рис 1.12 Програмне забезпечення Mission Planner версії 1.3.80.
Вкладка «Планувальник».

У вкладці планувальник здійснюється побудова місії, завантаження її на борт безпілотного апарату та відслідковування виконання місії.

Для точного виконання місії безпілотними апаратами використовується навігаційна система. У безпілотних літальних апаратах з використанням технологій ArduPilot навігаційна система зазвичай складається з двох основних компонентів – це система супутникової навігації та система інерційної навігації. Ці системи є важливою складовою апаратного та програмного забезпечення безпілотного апарату та є основними джерелами вхідних даних для польотного контролера. На основі цих даних здійснюється керування, стабілізація борта та виконання визначеної місії. Система супутникової навігації та система інерційної навігації можуть доповняти одне одну, корегувати дані однієї системи за допомогою іншої, а також працювати окремо у разі виходу з ладу або не коректних даних однієї з систем. Також можливі варіанти використання візуальної навігації та радіонавігації.

Супутникова навігаційна система безпілотного літального апарату призначена для позиціонування в просторі та часі, а також для визначення швидкості, напрямку

та інших параметрів руху борта, принцип роботи заснований на позиціонуванні об'єкту відносно супутників глобальних систем супутникової навігації на орбіті планети, швидкості поширення радіохвиль. На борту безпілотного літального апарату знаходиться приймач на який приймає та обробляє сигнали зі супутників. В залежності від характеристик приймача може використовуватись різна комбінація систем супутникової навігації. Основні глобальні системи супутникової навігації:

1. GPS (The Global Positioning System) - розроблена та утримується Сполученими Штатами Америки, система налічує одночасно 32 активних супутників, таким чином в будь-який час та на будь якій точці одночасно спостерігається від 4 до 12 супутників.

2. GLONASS (Global Positioning System) – радянсько-російська система, налічує угруповання з 24 активних супутники та резервні космічні апарати.

3. Galilio – європейська система, створена як альтернатива GPS та GLONASS, налічує угруповання з 30 супутників, 24 – активні, 6 – в стані гарячого резерву.

4. BeiDou – китайська система, повне угруповання складає 48 супутників, в стані активної роботи 35.

5. Існують також інші навігаційні системи такі, як IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) - Індії, QZSS (Quazi-Zenith Satellite System) – Японії, але поки ці системи не вийшли на глобальний рівень тому працюють, як регіональні.

Всі ці глобальні системи працюють за однаковим принципом, використовуючи різні технології та діапазони робочих частот. Від кількості супутникових навігаційних систем з яким може працювати приймач залежить точність місцеположення в просторі та часі, а також всі аспекти пов'язані з навігацією самого безпілотного літального апарату.

Хоч супутникова навігація рахується найбільш точним способом орієнтування, враховуючи, що системи можуть забезпечити точність визначення приймача до кількох десятків сантиметрів, цей спосіб не позбавлений недоліків, які

здебільшого пов'язані з фізичними властивостями хвиль та поширення їх в просторі, а саме:

- Затемнення сигналу – може виникнути при втраті прямої видимості приймача зі супутниками або недостатня кількість супутників необхідна для точного позиціонування, така ситуація притаманна під час прольоту через зони щільної забудови, коли висота прольоту менша за висоту навколишніх будівель, під час здійснення польотів в гірській місцевості, коли висота польоту набагато нижча висоти гір.
- Зниження або втрата сигналу – у разі коли атмосферні умови несприятливі, таких, як наприклад дощ, сніг, туман, щільна хмарність.
- Інтерференція сигналів від інших радіочастотних джерел або електронних пристроїв, що може вплинути на роботу приймача.
- Вплив іншого апаратного забезпечення чи джерел електромагнітного випромінювання безпілотного апарату у разі хибного розташування приймача.
- Вплив зовнішніх приладів, систем (наприклад спеціальні засоби подавлення сигналів супутникових систем навігації), що наміряно здійснюють подавлення частотних діапазонів сигналів супутникових систем навігації. Або наміряно здійснюють підміну сигналів супутникових систем навігації, в результаті чого приймач отримує хибну інформацію про місцезнаходження безпілотного апарату.

Інерційна система навігації являє собою набір апаратного забезпечення, що знаходиться на борту безпілотного літального апарату та не потребує зовнішнього додаткового устаткування для збору даних, так як наприклад в супутниковій системі навігації. Це технологічна система, що використовується для визначення місцезнаходження, орієнтації та швидкості безпілотного літального апарату в просторі, базується на принципах інерції та використовує набір датчиків та приладів для вимірювання різних параметрів такі, як зміни прискорення та кутової швидкості. Основні компоненти інерційної системи навігації:

- Акселерометр призначений для вимірювання прискорення та перевантажень безпілотного літального апарату в трьох взаємно перпендикулярних осях. Що дає дані для обчислення шляху, швидкості і положення борта, кут та напрям маневру в різних площинах, а також стабілізацію апарату в горизонтальній площині, компенсуючи прискорення викликане гравітацією планети та інші зовнішні чинники. Додатково використовується для визначення змін висоти безпілотного літального апарату над землею.
- Гіроскоп призначений для вимірювання кутової швидкості та обертання безпілотного літального апарату в трьох взаємно перпендикулярних осях. Гіроскоп використовуються спільно з акселерометрами, іншими датчиками та приймає участь у стабілізації апарату та компенсує зовнішні чинники.
- Магнітометр призначений для визначення положення безпілотного літального апарату відносно магнітного поля Землі. Використовується для корекції та утримання курсу борта під час здійснення польоту. А також магнітометр допомагає компенсувати вплив магнітних завад від феромагнітних матеріалів, які можуть впливати на точність вимірювань інших датчиків.
- Барометр призначений для вимірювання, утримання, зміни та корегування висоти безпілотного літального апарату на рівнем моря на основі атмосферного тиску.
- Трубка Піто призначена для вимірювання, керованої зміни та утримання повітряної швидкості безпілотного літального апарату на основі даних динамічного тиску повітря. Трубка Прандля – це удосконалена трубка Піто, що здатна визначити швидкість потоку повітря за допомогою виміру та порівняння динамічного та статичного тисків.

Наявність та кількість цих приладів залежить від конкретної моделі польотного контролера.

Нажаль порівняно з супутниковою системою навігації точність у позиціонуванні в інерційній системі в рази нижча. Це обумовлено певними факторами:

- Потребує початкового калібрування для зменшення початкової похибки. Помилки спричинені порушенням послідовності чи технології калібрування або зовнішніми факторами можуть вплинути на точність навігації в подальшому.
- Вібрації, перевантаження, температурні зміни безпілотного апарату може вплинути на точність приладів вимірювання.
- Більш надійніші та точніші прилади, датчики інерційної системи потребують більше ресурсів.
- Основний недолік – це кумулятивна похибка, через неточності вимірювання приладів та датчиків інерційної системи при виконанні місій на великі дальності або під час тривалого польоту, похибка накопичується і точність системи в рази падає.

З цього можливо зробити висновок, що інерційна система не може використовуватись, як основна система навігації, враховуючи її низьку точність при виконанні місій на великі відстані та тривалий час. По при це інерційну систему необхідно використовувати, як додаткова система навігації в умовах відсутності сигналів супутникової навігаційної системи або виходу з ладу приймача. Для ефективної роботи систем навігації безпілотного апарату необхідно створити скрип (та інтегрувати його) для взаємодії систем супутникової та інерційної навігації, що буде вирішувати два основних завдання:

1. Автоматичне відключення системи супутникової навігації у разі відсутності або нестабільного сигналу та перехід до інерційної системи навігації. При поверненні стабільного зв'язку з супутниковою системою відключення інерційної системи та використання системи супутникової навігації.
2. Інтегрувати дані інерційною системи з супутниковою системою навігації для мінімізації кумулятивної похибки та періодичного корегування приладів інерційної системи.

2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ

Найчастіше програмне забезпечення ArduPilot використовують з апаратним забезпеченням Pixhawk – це серія автопілотів (контролерів) для безпілотних апаратів, яку розробляє спільнота ArduPilot. Pixhawk має широкий асортимент продукції, але його головною перевагою є великий набір функціоналу та можливість використання на безпілотних засобах різного типу. Тому цей контролер користується популярністю серед простих користувачів та і серед комерційних проектах. Такі прилади, як акселерометр, магнітометр, гіроскоп відразу встановлені в контролер Pixhawk, також є можливість встановити додаткові прилади системи інерційної навігації за допомогою зовнішніх модулів. Серед лінійки контролерів Pixhawk найпопулярніші версії: 2.4.6 (Рис 2.1), Black CUBE (Рис 2.2), Orange (Blue) CUBE (Рис 2.3) на різних платформах .



Рис 2.1 Контролер Pixhawk версії 2.4.6 [10]



Рис 2.2 Контролер Pixhawk версії Black CUBE [11]



Рис 2.3 Контролери Pixhawk версії Blue і Orange CUBE. Ці версії однакові за характеристиками та функціональністю але виготовленні в різних країнах.[12],[13]

2.1 Проектування та розробка програмного коду.

Середовище розробки та мови програмування для написання скрипта:

Програмний код написаний на мові програмування C++ версії 11 (ISO/IEC 14882:2011 C++).

Програмне забезпечення:

польотного контролера ArduPilot версії 4.4.2.;

наземної станції управління Mission Planner 1.3.80, оперативна система Microsoft Windows версії 22H2;

драйвер зв'язку на приймач сигналу системи супутникової навігації з антенами Tualaj 4100 mini.

Апаратне забезпечення:

польотний контролер HEX PixHawk 2.1 CUBE Orange+;

приймач сигналу системи супутникової навігації з антенами Tualaj 4100 mini з системою CRPA [14].

Для написання скрипта та правильного його виконання потрібно визначити основні параметри системи супутникової навігації, а саме:

1. Визначення мінімальної кількості активних супутників від яких отримує сигнал приймач безпілотного літального апарату значення яких буде вважатися відсутністю сигналу системи супутникової навігації.
2. Визначення мінімальної кількості активних супутників від яких отримує сигнал приймач безпілотного літального апарату значення яких буде вважатися відновлення сигналу системи супутникової навігації.
3. Визначення часу наявності мінімальної кількості активних супутників від яких отримує сигнал приймач безпілотного літального апарату значення якого буде вважатися не стабільним сигналом системи супутникової навігації.
4. Визначення часу відсутності сигналу системи супутникової навігації після якого безпілотний літальний апарат переходить від використання системи супутникової навігації до інерційної системи навігації.
5. Визначення часу відновлення сигналу системи супутникової навігації після якого безпілотний літальний апарат переходить від використання інерційної системи навігації до системи супутникової навігації.

Розберемо перший та другий параметр: перший параметр рівняється значенню «менше 6», другий – «більше, рівно 6» тобто при зменшенні супутників до значення «5» - контролер не враховує дані системи супутникової навігації і починає використовувати систему інерційної навігації. При збільшенні кількості супутників до значення «6» контролер враховує дані супутникової.

Третій параметр матиме значення «0» секунд, тобто при значенні першого параметру «5» і менше - це системою рахується як не стабільний зв'язок.

Четвертий параметр матиме значення «0» секунд, тобто при значенні першого параметру «5» і менше контролер відразу не враховує дані системи супутникової навігації і починає використовувати систему інерційної навігації.

П'ятий параметр матиме значення «0» секунд, тобто при значенні другого параметру «6» і більше контролер відразу не враховує дані системи інерційної навігації і починає використовувати систему супутникової навігації.

Всі ці параметри описується в драйвері приймача сигналів системи супутникової навігації, та залежать від принципу роботи та характеристик обраного приймача. Дані значення описані для приймача сигналу системи супутникової навігації з антенами Tualaj 4100 mini з системою CRPA та обумовлені властивостями даного пристрою.

Для ефективного написання та інтегрування програмного коду була складена блок схема логіку роботи програмного коду переключення з супутникової системи навігації інерційну систему навігації та переключення з інерційної системи навігації на супутникову (Рис 2.4)

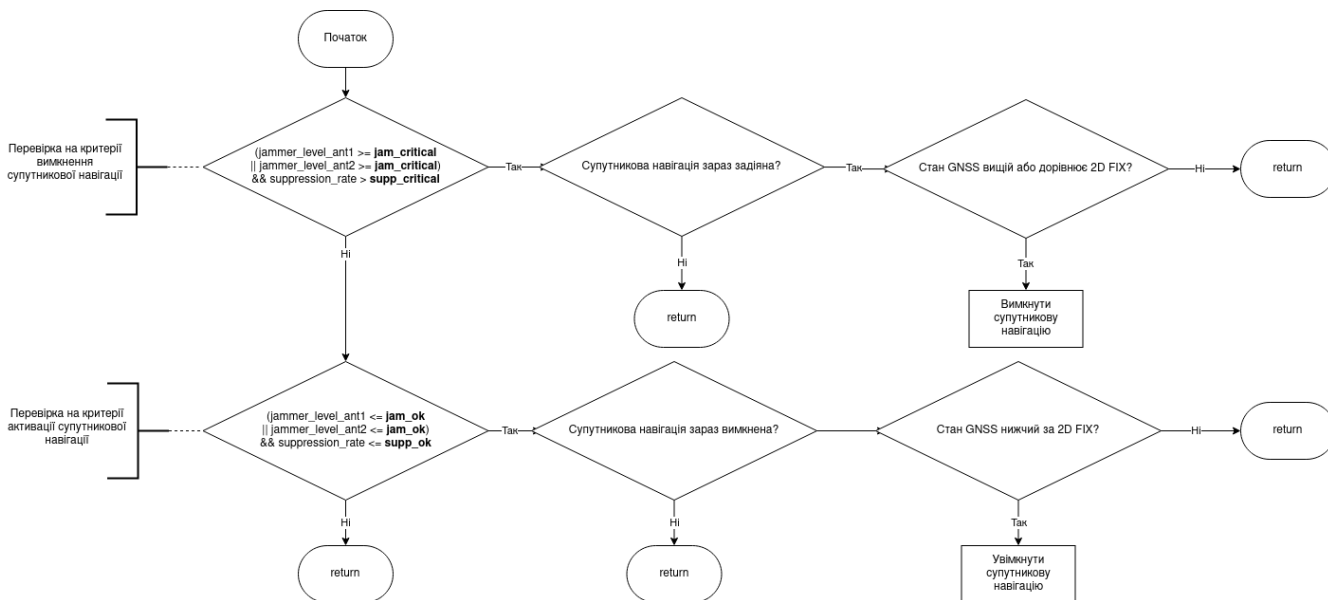


Рис 2.4 Блок схема логіки роботи програмного коду переключення з супутникової системи навігації інерційну систему навігації та переключення з інерційної системи навігації на супутникову

Приклад програмного коду переключення з супутникової системи навігації інерційну систему навігації та переключення з інерційної системи навігації на супутникову у взаємодії з драйвером зв'язку на приймач сигналу системи супутникової навігації з антенами Tualaj 4100 mini (Рис 2.5)

```

File Edit Selection View Go Run Terminal Help
update_CRP-A.txt X  протокол CRP-A.txt  Прошивка борта.txt
C: > звітність > звіт Кульвер > update_CRP-A.txt
1 // Алгоритм переключення з супутникової системи навігації
2 // на інерціальну систему навігації по значенням з CRP-A антени
3 void AP_AHRS::updateCRPA()
4 {
5     // Disable GNSS immediately after detecting critical jam level and supp rate
6     // Critical jam rate is >= AHRS_JAM_CRIT
7     // Critical supp rate is > AHRS_SUPP_CRIT
8
9     // Порівняння значень з CRP-A з граничними на вимкнення супутників
10    if ((AP::crpa().get_jammer_level_ant1() >= _jam_crit
11        || AP::crpa().get_jammer_level_ant2() >= _jam_crit)
12        && AP::crpa().get_supp_rate() >= _supp_crit) {
13        if (!gnss_switched_off) {
14            // Вимкнути GNSS
15            if (AP::gps().status() >= AP_GPS::GPS_OK_FIX_2D) {
16                AP::gps().force_disable(1);
17                gcs().send_text(MAV_SEVERITY_INFO, "GPS OFF");
18            }
19            gcs().send_text(MAV_SEVERITY_INFO, "Suppression rate CRITICAL");
20            gnss_switched_off = true;
21        }
22    }
23    // Порівняння значень з CRP-A з граничними на увімкнення супутників
24    if ((AP::crpa().get_jammer_level_ant1() <= _jam_ok
25        || AP::crpa().get_jammer_level_ant2() <= _jam_ok)
26        && AP::crpa().get_supp_rate() <= _supp_ok) {
27        if (gnss_switched_off) {
28            // Увімкнути GNSS
29            if (AP::gps().status() < AP_GPS::GPS_OK_FIX_2D){
30                AP::gps().force_disable(0);
31                gcs().send_text(MAV_SEVERITY_INFO, "GPS ON");
32            }
33            gcs().send_text(MAV_SEVERITY_INFO, "Suppression rate OK");
34            gnss_switched_off = false;
35        }
36    }
37 }

```

Рис 2.5 Варіант програмного коду переключення з супутникової системи навігації інерційну систему навігації та переключення з інерційної системи навігації на супутникову у взаємодії з драйвером зв'язку на приймач сигналу системи супутникової навігації з антенами Tualaj 4100 mini

Код поділяється на дві основних частини, а саме алгоритм для використання системи супутникової навігації та використання системи інерційної навігації.

2.2. Тестування скрипта та оцінка якості:

Основна мета тестування - перевірити виконання коду, шляхом аналізу даних з польотного контролера після виконання місії безпілотним апаратом.

Основні завдання, які ставляться під час тестуванні:

1.Перевірити реакцію системи безпілотного літального апарату на відсутність (подавлення) сигналів супутникової системи навігації.

2.Перевірити реакцію системи безпілотного літального апарату при переключенні з супутникової системи навігації на інерційну систему навігації.

3.Перевірити реакцію системи безпілотного літального апарату після відновлення сигналів супутникової системи навігації.

4.Перевірити реакцію системи безпілотного літального апарату при переключенні з інерційної системи навігації на супутникову систему навігації.

5.Перевірити комплексування інерційної системи навігації системою супутникової навігації.

Для тестування програмного коду використано:

- Безпілотний літальний апарат невизначеного типу з польотним контролером HEX PixHawk 2.1 CUBE Orange+;
- Приймач сигналу системи супутникової навігації з антенами Tualaj 4100 mini з системою CRPA;
- Пристрій для подавлення частотного діапазону систем супутникової навігації невизначеного типу.
- Програмне забезпечення польотного контролера ArduPilot версії 4.4.2;
- Програмне забезпечення наземної станції управління Mission Planner 1.3.80,
- Оперативна система наземної станції управління Microsoft Windows версії 22H2;
- Драйвер зв'язку для приймача сигналу системи супутникової навігації з антенами Tualaj 4100 mini.

Результати тестування відображено в таблиці 1 на основі графіків (Рис. 2.6, 2.7, 2.8, 2.9) з журналу даних з Mission Planner 1.3.80 (програмне забезпечення наземної станції керування). Таблиця представляє собою чекліст з етапами перевірки системи та результатом перевірки (за критерієм виконано або не виконано).

Таблиця 1. Результати тестування програмного коду переключення з супутникової системи навігації інерційну систему навігації та переключення з інерційної системи навігації на супутникову у взаємодії з драйвером зв'язку на приймач сигналу системи супутникової навігації з антенами Tualaj 4100 mini.

№ п/п	Перевірка (вказується умови та реакція системи)	Результат
1.	Система безпілотного апарату виявляє відсутність сигналів супутникової навігації.	виконано
2.	Система безпілотного апарату не враховує дані системи супутникової навігації після відсутності сигналів супутникової навігації.	виконано
3.	Система безпілотного апарату використовує дані системи інерційної навігації (ігнорує дані системи супутникової навігації)	виконано
4.	Система безпілотного апарату виявляє відновлення сигналів супутникової навігації.	виконано
5.	Система безпілотного апарату не враховує дані системи інерційної навігації після відновлення сигналів супутникової навігації.	виконано
6.	Система безпілотного апарату використовує дані системи супутникової навігації (ігнорує дані системи інерційної навігації)	виконано
7.	Система інерційної навігації комплексує кумулятивну похибку використовуючи систему супутникової навігації.	виконано

Далі розглянемо графіки з журналу даних наземної станції керування.

На графіках №1 (Рис. 2.6) та №2 (Рис 2.7) зображено реакцію системи безпілотного літального апарату на відсутність (подавлення) сигналів супутникової системи навігації, а саме:

- Крива жовтого кольору відображає загальну кількість видимих супутників, які передають сигнали на приймач з антенами Tualaj 4100 mini.
- Крива синього та червоного кольору відображає рівень подавлення антени №1 та антени №2 відповідно, приймача сигналу системи супутникової навігації Tualaj 4100 mini.
- Крива зеленого відображає рівень інтенсивності загального подавлення антени №1 та антени №2 приймача Tualaj 4100 mini.

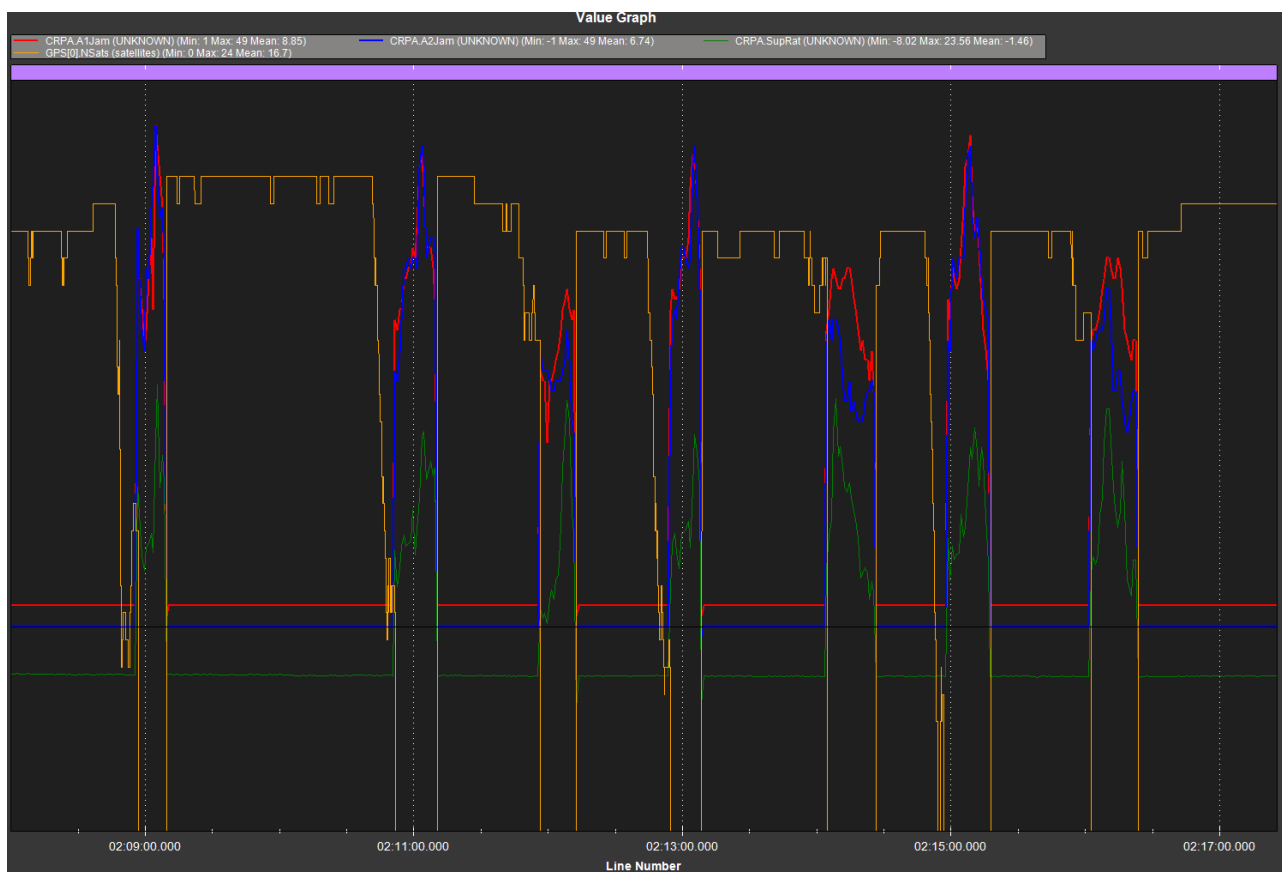


Рис 2.6 Графік реакції системи безпілотного апарату на відсутність сигналів системи супутникової навігації. Декілька проміжків.



Рис 2.7 Графік реакції системи безпілотного апарату на відсутність сигналів системи супутникової навігації. Один проміжок.

На графіках №1 (Рис. 2.6) та №2(Рис. 2.7) відображено періоди роботи пристрою для подавлення частотного діапазону систем супутникової навігації невизначеного типу в активному режимі та реакцію системи безпілотного літального апарату, що супроводжується різким зменшенням, а в подальшому відсутністю сигналів супутникової системи навігації, збільшення рівня подавлення антени №1 та антени №2, збільшення рівня інтенсивності загального подавлення антени №1 та антени №2 приймача Tualaj 4100 mini. А також відновлення сигналів системи супутникової навігації після переходу пристрою для подавлення частотного діапазону систем супутникової навігації невизначеного типу в пасивний режим або його вимкнення. З метою якісного тестування роботи програмного коду умови для відсутності сигналів системи супутникової навігації відтворювались декілька разів для порівняння реакції системи безпілотного апарату.

На графіку №3 (Рис 2.8) зображено ефективність виконання місії безпілотним літальним апаратом з використання інерційної системи навігації при відсутності сигналів супутникової системи навігації. Та відображено кумулятивна похибка інерційної системи навігації та комплексування інерційної системи супутниковою системою навігації .

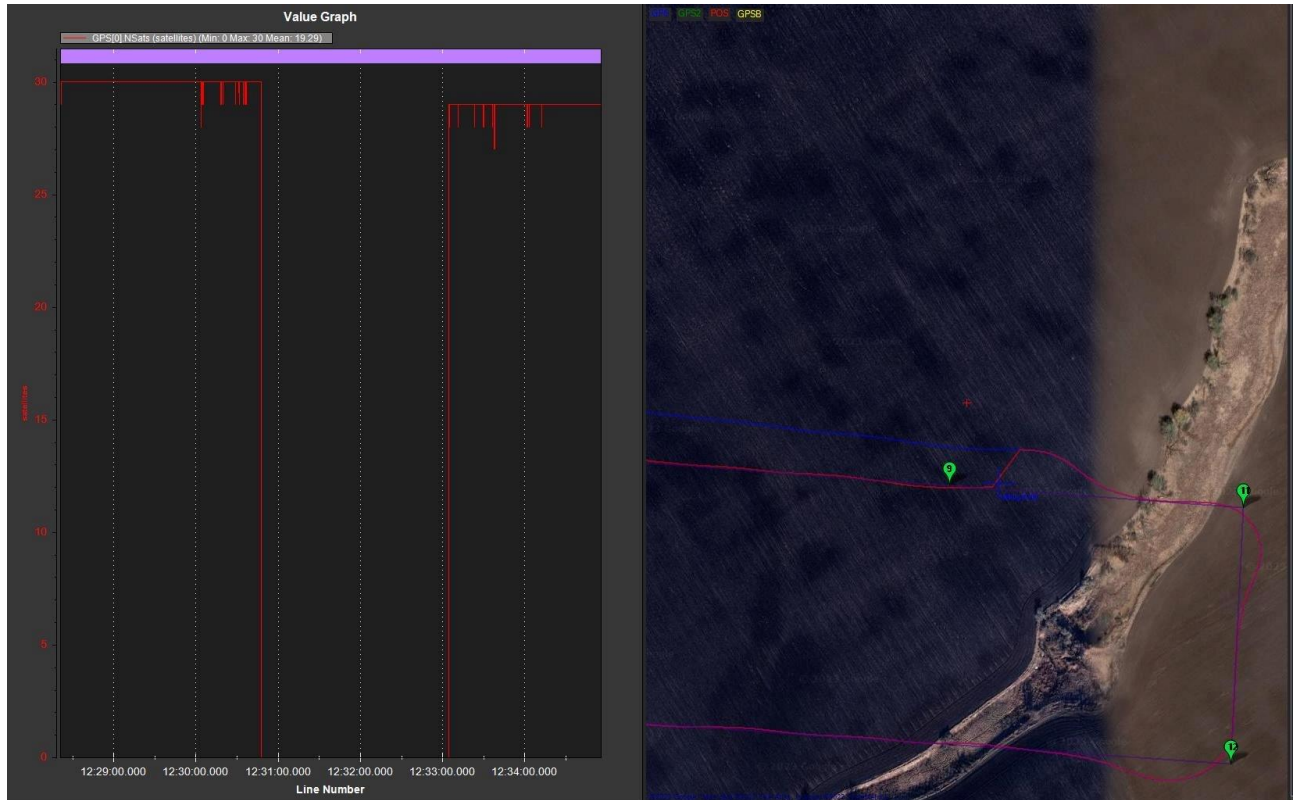


Рис 2.8 Графік реакції системи безпілотного апарату на відсутність сигналів системи супутникової навігації. Відображення кумулятивної похибки.

Червона крива на графіку №3 (Рис 2.8) відображає кількість супутників, які використовує приймач супутникової навігації. Спад показника кількості супутників означає початок роботи пристрою для подавлення частотного діапазону супутникової навігації невизначеного типу, ігнорування даних системи супутникової навігації та початок обробки даних з системи інерційної навігації. Збільшення показника кількості супутників означає закінчення роботи пристрою для подавлення частотного діапазону систем супутникової навігації невизначеного типу, закінчення оброблення контролером даних системи інерційної навігації, початок використання системи супутникової навігації. А також початок комплексування кумулятивної похибки інерційної системи.

Вкладка «Планувальник» Mission Planner де відображено місію борта (Рис 2.8):

- Фіолетовим кольором позначено запланований маршрут з відповідною нумерацією точок маршруту (між маршрутними точками №9 та №11 знаходиться команда).
- Червоним кольором позначено маршрут, який безпілотний літальний апарат пройшов використовуючи систему інерційної навігації і систему супутникової навігації.
- Синім кольором відображено кумулятивну похибку інерційної системи навігації та її комплексування (коригування) системою супутникової навігації.

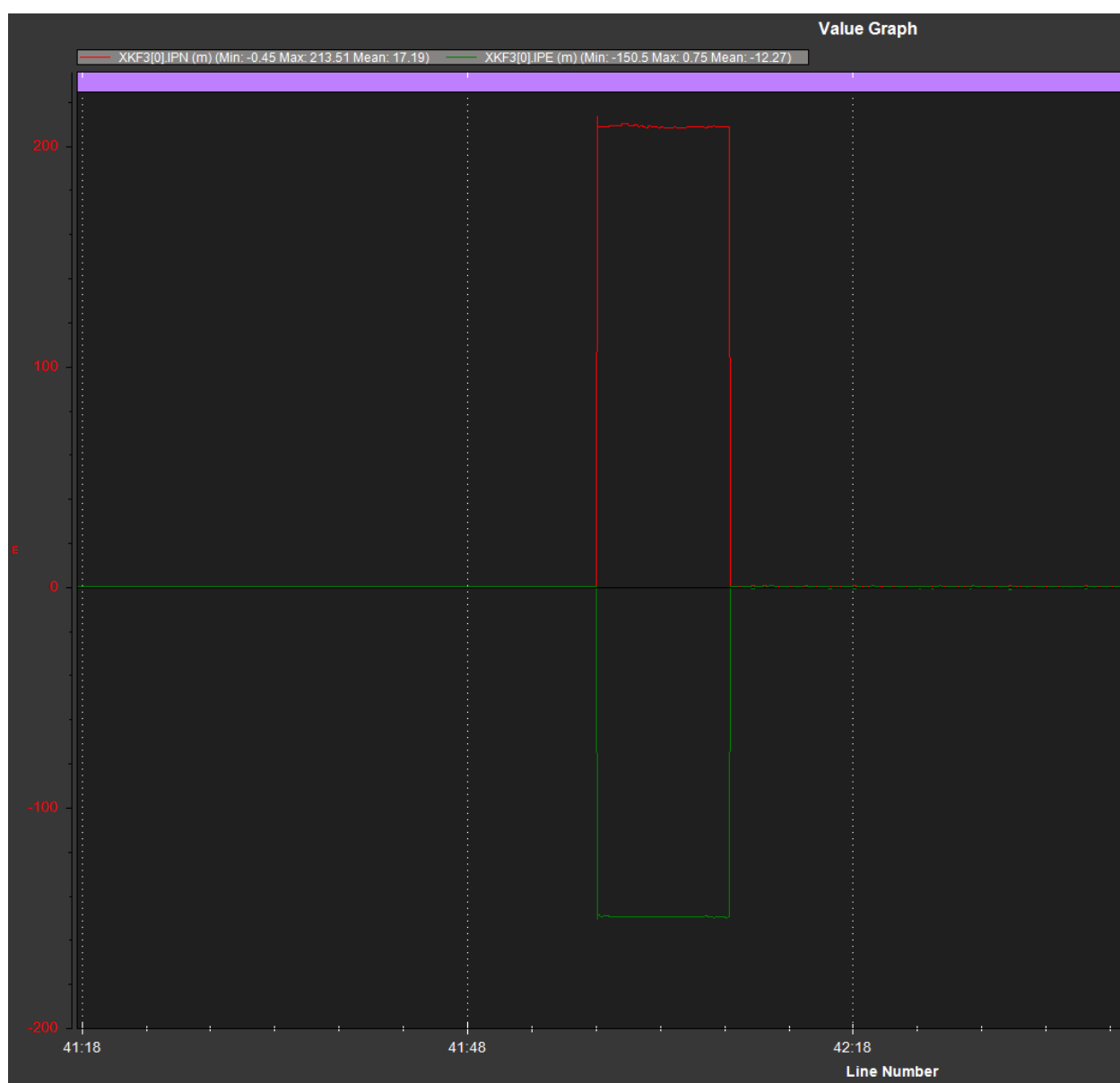


Рис 2.9 Графік відображення величини кумулятивної похибки.

На графіку №4 відображено величину кумулятивної похибки під час використання безпілотним літальним апаратом системи інерційної навігації.

Червоним кольором позначено величину кумулятивної похибки по широті відповідно до системи географічних координат.

Зеленим кольором позначено величину кумулятивної похибки по довготі відповідно до системи географічних координат.

2.3. Результат розробки скрипта

Результатом розробки є програмний код для переключення з супутникової системи навігації інерційну систему навігації та переключення з інерційної системи навігації на супутникову. Скрипт інтегровано в загальну структуру програмного забезпечення ArduPilot версії 4.4.2 польотного контролера HEX PixHawk 2.1 CUBE Orange+.

Також було проведено тестування та перевірено ефективність виконання програмного коду у взаємодії з драйвером зв'язку для приймача сигналу системи супутникової навігації з антенами Tualaj 4100 mini. Під час тестування було здійснено шість польотів та в подальшому проведено аналіз даних з журналу польотного контролера. Для якісного тестування вході виконання польотів безпілотний літальний апарат піддавався впливу пристроєм для подавлення частотного діапазону систем супутникової навігації невизначеного типу, що дало змогу створити умови при, яких сигнали систем супутникової навігації були відсутні.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.

Законодавство України про охорону праці – це система взаємопов’язаних законів та інших нормативно-правових актів, що регулюють відносини у сфері реалізації державної політики щодо соціального захисту громадян в процесі трудової діяльності.

Воно складається із Закону України “Про охорону праці”, Кодексу законів про працю України, Закону України “Про загальнообов’язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності” та прийнятих відповідно до них нормативно-правових актів.

Базується законодавство України про охорону праці на Конституції України, яка встановлює право людини на належні, безпечні і здорові умови праці (стаття 43), право на відпочинок, що забезпечується наданням днів щотижневого відпочинку, оплачуваної відпустки, встановленням скороченого робочого дня щодо окремих професій та виробництв, скороченої тривалості роботи у нічний час (стаття 45). Конституція України передбачає спеціальні заходи щодо охорони праці і здоров’я жінок (стаття 24) та інше [15].

Головною метою охорони праці є створення на кожному робочому місці безпечних умов праці, умов безпечної експлуатації обладнання, зменшення або повна нейтралізація дій шкідливих і небезпечних виробничих факторів на організм людини, зниження рівня виробничого травматизму та професійних захворювань. Проблеми створення безпечних і нешкідливих умов праці існували завжди. Проте у період науково-технічного прогресу вони набули особливого значення.

Створення безпечних і здорових умов праці сприяє підвищенню її продуктивності та зниженню собівартості продукції. Підвищення продуктивності відбувається за рахунок зниження стомлюваності працівників протягом робочого часу, його раціонального використання.

3.1 Охорона праці оператора ЕОМ

Науково-технічний прогрес вніс серйозні зміни в умови виробничої діяльності працівників розумової праці. Їх праця стала більш інтенсивною, напруженою, вимагаючи значних витрат розумової, емоційної і фізичної енергії. Це потребує комплексного рішення проблем ергономіки, гігієни і організації праці, регламентації режимів праці і відпочинку [20, 21].

В даний час комп'ютерна техніка широко застосовується у всіх областях діяльності людини. При роботі з комп'ютером людина піддається дії ряду небезпечних і шкідливих виробничих чинників: електромагнітних полів (діапазон радіочастот: ВЧ, УВЧ і НВЧ), інфрачервоного і іонізуючого випромінювання, шуму і вібрації, статичної електрики і інше.

Робота з комп'ютером характеризується значною розумовою напругою і нервово-емоційним навантаженням операторів, високою напруженістю зорової роботи і достатньо великим навантаженням на м'язи рук при роботі з клавіатурою ЕОМ. Велике значення має раціональна конструкція і розташування елементів робочого місця, що важливе для підтримки оптимальної робочої пози людини-оператора.

В процесі роботи з комп'ютером необхідно дотримувати правильний режим праці і відпочинку. Інакше у персоналу наголошуються значна напруга зорового апарату з появою скарг на незадоволеність роботою, головні болі, дратівливість, порушення сну, утомленість і хворобливі відчуття в очах, в поясниці, в області шиї і руках.

3.2. Охорона праці під час воєнного стану.

Відповідно до пункту 31 частини першої статті 85 Конституції України, Закону України "Про правовий режим воєнного стану" Верховна Рада України постановила:

1. Затвердити Указ Президента України від 6 листопада 2023 року №734/2023 "Про продовження строку дії воєнного стану в Україні".
2. Цей Закон негайно оголошується через засоби масової інформації та набирає чинності з дня його опублікування [16].

Закон України «Про затвердження Указу Президента України "Про продовження строку дії воєнного стану в Україні" від 08.11.2023 р. № 3429-IX був опублікований 10 листопада 2023 року в газеті «Голос України», відповідно закон набрав чинності з дня опублікування. Тобто відповідно до законів воєнний стан в Україні продовжено на 90 днів до 14 лютого 2024 року.

Після введення воєнного стану згідно з Указом Президента України від 24.02.2022 № 64 у зв'язку з воєнною агресією російської федерації проти України було внесено важливі і необхідні правові зміни у трудове законодавство та нормативні акти з охорони праці.

Розглянемо найважливіші зміни, які відбулися трудове законодавство та нормативні акти з охорони праці після введення воєнного стану.

Норми законодавства про працю в умовах воєнного стану регламентуються Законом України Про організацію трудових відносин в Умовах воєнного стану (Із змінами, внесеними згідно із Законом №2352-IX від 01.07.2022). Отож перш всього згідно статті 1 п.2 - на період дії воєнного стану вводяться обмеження конституційних прав і свобод людини і громадянина передбачених статтями 43, 44 Конституції України [17], а саме стаття 43 Конституції України - кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає або на яку вільно погоджується, стаття 44 Конституції України - ті,

хто працює, мають право на страйк для захисту своїх економічних і соціальних інтересів [18].

Також зміни торкнулися тривалості робочого часу та відпочинку, а саме:

Згідно статті 6, п.1 Закону № 2136 нормальна тривалість робочого часу у період дії воєнного стану може бути збільшена до 60 годин на тиждень для працівників, зайнятих на об'єктах критичної інфраструктури (в оборонній сфері, сфері забезпечення життєдіяльності населення тощо). Збільшення тривалості робочого часу у період воєнного стану до 60 годин на тиждень є правом роботодавця і не передбачає встановлення такої тривалості для всіх в обов'язковому порядку [17]. Однак в статті 6 п.2 Закону України № 2136 вказано що для працівників, зайнятих на об'єктах критичної інфраструктури, яким відповідно до законодавства встановлюється скорочена тривалість робочого часу, тривалість робочого дня у період дії воєнного стану не може перевищувати 40 годин на тиждень [17].

Згідно статті 1 п. 13 Закону України Про критичну інфраструктуру, об'єкти критичної інфраструктури – це об'єкти інфраструктури, системи, їх частини та їх сукупність, які є важливими для економіки, національної безпеки та оборони, порушення функціонування яких може завдати шкоди життєво важливим національним інтересам [19].

Зміни торкнулися і робочого графіку працівників, а саме відповідно Закону України Про організацію трудових відносин в Умовах воєнного стану статті 6 Особливості встановлення та обліку часу роботи та часу відпочинку, пункту 4. Час початку і закінчення щоденної роботи (зміни) визначається роботодавцем, а також пункту 5. Тривалість щотижневого безперервного відпочинку може бути скорочена до 24 годин [17].

Також відповідно пункту 6. статті 6 Закону України № 2136 у період дії воєнного стану не застосовуються норми статті 53 (тривалість роботи напередодні святкових, неробочих і вихідних днів), частини першої статті 65 (граничні норми застосування надурочних робіт), частин третьої — п'ятої статті 67 (перенесення вихідного дня на наступний день після святкового або неробочого дня), статті 71

(заборона роботи у вихідні дні), статті 73 (святкові і неробочі дні), статті 781 (неврахування святкових і неробочих днів при визначенні тривалості щорічних відпусток) Кодексу законів про працю України [17].

Всі ці фактори та чинники знижують соціальний захист громадян в процесі трудової діяльності але це необхідно у зв'язку з воєнною агресією російської федерації проти України. Тому для підвищення морального та фізичного здоров'я потрібно вживати певних заходів, а саме зайняття спортом, прогулянки на свіжому повітрі, при необхідності відвідування психолога. А також для збереження життя і здоров'я необхідно виконувати визначені інструкції на робочому місці при оголошенні повітряної тривоги. Всі ці заходи забезпечать особисту безпеку та ефективність під час виконання службових обов'язків.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання даної роботи було спроектовано, написано та інтегровано скрипт в програмне забезпечення ArduPilot. Програмний код передбачає реакцію системи польотного контролера у випадку відсутності сигналу системи супутникової навігації, а саме ігнорування даних системи супутникової навігації та використання даних з системи інерційної навігації. Реакцію системи польотного контролера у випадку відновлення сигналу системи супутникової навігації, а саме ігнорування даних з системи інерційної навігації та використання даних з системи супутникової навігації. А також після відновлення сигналу системи супутникової навігації комплексування кумулятивної похибки системи інерційної навігації.

Для якісного тестування та перевірки ефективності скрипта було здійснено практичне застосування безпілотного літального апарату. В результаті тестування було підтверджено, що програмний код працює відповідно встановлених вимог, що підтверджується аналізом даних з журналу польотного контролера після виконання польотів.

В подальшому скрипт може бути доопрацьований для можливості взаємодії з іншим програмним забезпеченням, а саме драйвери до приймачів систем супутникової навігації, версія програмного забезпечення ArduPilot та іншим апаратним забезпеченням, а саме приймачі систем супутникової навігації, зовнішні модулі системи інерційної навігації, версії автопілотів лінійки Pixhawk та інші сумісні з ArduPilot.

А також в подальшому програмний код може бути адаптований для безпілотних апаратів водного та наземного типів, що збільшить можливості комплексного застосування безпілотних апаратів в різних середовищах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. «Про програмне забезпечення ArduPilot». [Електронний ресурс] URL: <https://ardupilot.org/>
2. «Про програмне забезпечення PX4». [Електронний ресурс] URL: <https://px4.io/>
3. «Про мову програмування C++». [Електронний ресурс] URL <https://isocpp.org/>
4. «Рейтинг мов програмування 2023 року журналу IEEE Spectrum» [Електронний ресурс] URL <https://spectrum.ieee.org/the-top-programming-languages-2023/>
5. «Рейтинг мов програмування 2023 року на сайті спільноти DOU» [Електронний ресурс] URL <https://dou.ua/lenta/articles/language-rating-2023/>
6. «UAV Warmate-R, WB Group». [Електронний ресурс] URL <https://www.wbgroup.pl/produkt/warmate-rozpoznawczy-r/>
7. «UAV A1-СМ, АТЛОН АВІА». [Електронний ресурс] URL <https://athlonavia.com/uk-furia/>
8. «UAV CICONIA, DeVIRo». [Електронний ресурс] URL <https://deviro.ua/ukr/>
9. «UAV Vector, QuantumSystems». [Електронний ресурс] URL <https://quantum-systems.com/vector/>
10. «Контролер Pixhawk версії 2.4.6». [Електронний ресурс] URL <https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html/>
11. «Контролер Pixhawk Black CUBE». [Електронний ресурс] URL <https://ardupilot.org/copter/docs/common-thecube-overview.html/>
12. «Контролер Pixhawk Blue CUBE». [Електронний ресурс] URL <https://docs.cubepilot.org/user-guides/autopilot/the-cube-module-overview/>
13. «Контролер Pixhawk Orange CUBE». [Електронний ресурс] URL <https://ardupilot.org/copter/docs/common-thecubeorange-overview.html/>

14. «CRPA Tualaj 4100 mini». [Електронний ресурс] URL <https://www.tualcom.com/gps-gnss-anti-jam-crpa/tualaj-4100-mini/>
15. «Закон України про охорону праці, розділ 1, стаття 1». [Електронний ресурс] URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text/>
16. «Закон України про затвердження Указу Президента України». [Електронний ресурс] URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3429-20#Text/>
17. «Закон України Про організацію трудових відносин в Умовах воєнного стану ст.1 п.2, ст.6 п.1,2 ». [Електронний ресурс] URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2136-20#Text/>
18. «Конституція України ст43, 44». [Електронний ресурс] URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#n4310/>
19. «Закону України Про критичну інфраструктуру ст.1 п.13» [Електронний ресурс] URL <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text/>
20. Методичні вказівки до виконання атестаційної роботи магістра за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення (Освітньо-професійна програма - «Програмне забезпечення систем», Освітньо-наукова програма - «Інженерія програмного забезпечення») для студентів усіх форм навчання / Упор.: М.Р. Петрик, Д.М. Михалик, О.Ю. Петрик, Г.Б. Цуприк - Тернопіль: ТНТУ, 2020-51с.
21. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ» // В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., –156 с. Режим доступу до ресурсу: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>.
22. Навчальний посібник «ТЕХНОЕКОЛОГІЯ ТА ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА. ЧАСТИНА «ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА»» // автор-укладач В.С. Стручок–Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с. Режим доступу до ресурсу: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Тези конференції

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

МАТЕРІАЛИ

XI НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



13-14 грудня 2023 року

**ТЕРНОПІЛЬ
2023**

УДК 004.41

Б.С.Таранін, О.Р.Цебрій, канд. техн. наук, доц.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

**РОЗРОБКА СКРИПТУ ДЛЯ ІНТЕГРАЦІЇ СКЛАДОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ
ІНЕРЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ «ARDUPILOT»**

B.S.Taranin , O.R.Tsebriy, PhD, Assoc.Prof.

**DEVELOPMENT OF A SCRIPT FOR INTEGRATION COMPONENT ELEMENTS OF
THE INERTIAL SYSTEM USING «ARDUPILOT» TECHNOLOGIES**

Розвиток технологій та сучасність все більше дозволяють застосовувати роботів у всіх сферах діяльності людини: від виконання простих механічних дій до створення автономних виробництв без прямого втручання людини. Під значенням робота розуміється будь-який механізм (група механізмів), спроможний виконувати фізичну або/та інтелектуальну роботу за відповідними заданими алгоритмами з участю або без участі людини. Застосування новітніх технологій дозволяє роботам автономно виконувати певний спектр робіт (не враховуючи заходи щодо обслуговування та ремонту роботів), а також забезпечує виконання робіт людиною.

З розвитком апаратного та програмного забезпечення, підвищенням якості технологій спектр робіт, які виконують роботи, постійно збільшується, попит постійно зростає. Проте висока вартість не дозволяє охопити всі сфери діяльності з розрахунку окупності технологій.

Розглянемо основні переваги та недоліки роботів на прикладі автоматизованого виробництва. До переваг можливо віднести:

1. Економію часу. Скорочення часу циклу виробництва.
2. Збільшення продуктивності.

3. Можливе використання в умовах небезпечних для людини. Наприклад, при виробництві, пов'язаному із небезпечними, отруйними, радіаційними речовинами.

4. Підвищення надійності процесів та якості продуктів виробництва. Роботи працюють в межах заданих алгоритмів і параметрів, це виключає людські помилки і дає прогнозований результат виробництва та встановленої якості.

5. Зменшення витрат на робочу силу. Автоматизація виробництва дозволяє суттєво зменшити персонал та витрати пов'язані з ним.

6. Виконання робіт, які знаходяться за межами людських можливостей або потребують великих людських ресурсів:

- фізичних, наприклад: швидкість, вантажопідйомність, робота з мікродеталлями, відсутність кисню, високі або низькі температури, високий або низький тиск та інше;

- інтелектуальних, наприклад: обчислювальні операції, які потребують швидкості та точності розрахунків, швидка обробка великих обсягів вхідних даних та отримання результату.

7. Виконання специфічних робіт, які не притаманні людині.

8. Заміна людської праці при виконанні монотонної роботи.

До основних недоліків автоматизованого виробництва можна віднести:

1. Високу вартість досліджень, розроблення, тестування апаратного та програмного забезпечення. Особливо у випадках пов'язаних зі специфічним застосуванням роботів.

2. Високу вартість роботів та технологій. Автоматизація виробництва вимагає великих початкових інвестицій.