

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та  
робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

перший (бакалаврський)  
(рівень вищої освіти)

Розробка апаратно-програмного модуля синхронізації пульта керування  
FPV дроном до програми симуляції польоту  
(тема)

Виконав:  
здобувач IV року навчання,  
групи АКТСІ-21-1  
Тимофій РАЄНКО  
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальності 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва напряму)

Тип програми Освітньо-професійна  
Освітня програма Системна інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. каф. КІТАР Дмитро Гурін  
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту  
Завідувач кафедри КІТАР \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ  
(власне ім'я, прізвище)

Я, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію та підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав та не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

09.06.2025



Тимофій РАЄНКО

(власне ім'я, прізвище)

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет	АКТ
Кафедра	КІТАР
Рівень вищої освіти	перший (бакалаврський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	Освітньо-професійна
Освітня програма	Системна інженерія (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« 03 » березня 2025р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Раєнко Тимофію Володимировичу  
(шифр і назва)

1. Тема роботи: Розробка апаратно-програмного модуля синхронізації пульта керування FPV дроном до програми симуляції польоту

Затверджена наказом університету від \_\_\_\_\_ 19.05.2025 №391Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 18.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Плата обробки PPM-сигналу на базі мікроконтролеру; 3.2 Живлення від USB-порту 5 В

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз сучасних пультів керування FPV дроном та їх технічні характеристики;

4.3 Аналіз програм для симуляції польоту керування FPV дроном; 4.4 Аналіз існуючих методів та апаратних рішень підключення пульта керування FPV дронами до ПК;

4.5 Розробка структурної схеми модуля підключення пульта керування FPV дроном; 4.6 Вибір апаратних модулів та аналіз їх характеристик;

4.7 Розробка схеми підключення апаратних модулів;

4.8 Розрахунок ширини та тривалості PPM -імпульсів FlySky FS-I6;

4.9 Розрахунок стійкості системи керування; 4.10 Складання макета модуля підключення пульта FlySky FS-I6 до симулятора польоту;

4.11 Обґрунтування та вибір середовища розробки; 4.12 Розробка алгоритму роботи програми;

4.13 Розробка програми обробки сигналів з пульта керування FlySky FS-I6 для модуля Arduino Pro Micro; 4.14 Калібрування та налаштування апаратно-програмного модуля;

4.15 Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів; 4.16 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(\*.ppt) формату А4 – 10-15 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Прим.
1	Аналіз сучасних пультів керування FPV дроном та симуляторів польоту	24.03.2025-29.03.2025	викон.
2	Розробка структурної схеми модуля підключення пульта керування FPV дроном	30.03.2025-02.04.2025	викон.
3	Вибір апаратних модулів та аналіз їх	03.04.2025-08.04.2025	викон.
4	Розробка схеми підключення апаратних модулів	09.04.2025-13.04.2025	викон.
5	Розрахунок ширини та тривалості PPM-імпульсів FlySky FS-I6	14.04.2025-17.04.2025	викон.
6	Розрахунок стійкості системи керування	18.04.2025-21.04.2025	викон.
7	Складання макета модуля підключення FlySky FS-I6 до симулятора польоту	22.04.2025-02.05.2025	викон.
8	Вибір середовища розробки	03.05.2025-04.05.2025	викон.
9	Розробка алгоритму роботи програми	05.05.2025-10.05.2025	викон.
10	Розробка програми обробки сигналів з FlySky FS-I6 для модуля Arduino Pro Micro	11.05.2025-23.05.2025	викон.
11	Калібрування та налаштування апаратно-програмного модуля	24.05.2025-01.06.2025	викон.
12	Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів	02.06.2025-06.06.2025	викон.
13	Оформлення пояснювальної записки	07.06.2025-08.06.2025	викон.

Дата видачі завдання 3 березня 2025р.

Здобувач \_\_\_\_\_

(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

Тимофій РАСНКО

(власне ім'я, прізвище)

ст. викл. Дмитро ГУРІН

(посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 78 с., 8 табл., 17 рис., 3 дод., 27 джерел.

FPV ДРОН, СИМУЛЯТОР, ПУЛЬТ КЕРУВАННЯ, ARDUINO, PPM-СИГНАЛ, МОДУЛЬ, СИНХРОНІЗАЦІЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, НАВЧАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ.

Мета роботи – покращення навчання операторів FPV дроном, за рахунок розробки модуля підключення пульта керування до симулятора польоту на ПК.

Об'єкт розробки – процес керування FPV дроном.

Предмет розробки – алгоритми, апаратне та програмне забезпечення керування FPV дроном в симуляторі польоту.

В кваліфікаційній роботі проведено аналіз сучасних пультів керування FPV дроном та симуляторів польоту. Розроблено структурну схему модуля підключення пульта керування FPV дроном, проведено вибір апаратних модулів та проаналізовано їх характеристики. Розроблено схему підключення апаратних модулів. Розраховано ширину та тривалість PPM-імпульсів FlySky FS-I6 та стійкість системи керування. Проведено складання макета модуля підключення FlySky FS-I6 до симулятора польоту, обґрунтування та вибір середовища розробки. Розроблено алгоритм роботи програми та програму обробки сигналів з FlySky FS-I6 для модуля Arduino Pro Micro. Проведено калібрування та налаштування апаратно-програмного модуля та експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів. Отримані результати кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілей сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.4.

## ABSTRACT

Explanatory note: 78 pages, 8 tables, 17 figures, 3 app, 27 sources.

FPV DRONE, SIMULATOR, CONTROL PANEL, ARDUINO, PPM SIGNAL, MODULE, SYNCHRONIZATION, SOFTWARE, TRAINING, SIMULATION.

The purpose of the work is to improve the training of FPV drone operators by developing a module for connecting the control panel to a flight simulator on a PC.

The object of development is the process of controlling an FPV drone.

The subject of development is algorithms, hardware and software for controlling an FPV drone in a flight simulator.

In the qualifying papers, an analysis of real FPV drone control panels and field simulators was carried out. The structural diagram of the FPV drone control panel connection module was developed, hardware modules were selected and their characteristics were analyzed. A scheme for connecting hardware modules has been developed. The reliability and duration of FlySky FS-I6 PPM pulses and the stability of the conditioning system have been increased. Storage of the layout of the FlySky FS-I6 connection module to the simulator canvas, launch and selection of intermediate developments was carried out. An algorithm for program operation and a signal processing program with FlySky FS-I6 for the Arduino Pro Micro module have been developed. Calibration and installation of the hardware and software module, experimental research and analysis of the obtained results were carried out. Having approved the results of the qualification work, it is possible to give Objectives of the permanent answer 9 "Industry, innovations and infrastructure", as well as 9.4.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз сучасних пультів керування FPV дроном та симуляторів польоту..	12
1.1 Аналіз сучасних пультів керування FPV дроном та їх технічні характеристики .....	12
1.2 Аналіз програм для симуляції польоту керування FPV дроном.....	15
1.3 Аналіз існуючих методів та апаратних рішень підключення пульта керування FPV дронами до ПК.....	17
2 Розробка апаратного модуля підключення пульта FlySky до симулятора польоту .....	21
2.1 Розробка структурної схеми модуля підключення пульта керування FPV дроном.....	21
2.2 Вибір апаратних модулів та аналіз їх характеристик.....	23
2.3 Розробка схеми підключення апаратних модулів.....	26
2.4 Розрахунок ширини та тривалості PPM -імпульсів FlySky FS-I6.....	29
2.5 Розрахунок стійкості системи керування .....	31
2.6 Складання макета модуля підключення пульта FlySky FS-I6 до симулятора польоту .....	34
3 Розробка програми синхронізації передачі даних з пульта FlySky до симулятора польоту .....	36
3.1 Обґрунтування та вибір середовища розробки .....	36
3.2 Розробка алгоритму роботи програми .....	38
3.3 Розробка програми обробки сигналів з пульта керування FlySky FS-I6 для модуля Arduino Pro Micro.....	40
3.4 Калібрування та налаштування апаратно-програмного модуля .....	44
3.5 Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.....	46

3.6 Охорона праці.....	52
Висновки .....	54
Перелік джерел посилання .....	56
Додаток А Код програми.....	61
Додаток Б Апробація результатів наукових досліджень .....	65
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	77

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

БПЛА – безпілотні літальні апарати;

ПК – персональний комп'ютер;

САК – система автоматичного керування;

ФЧХ – фазочастотна характеристика;

FPV – first person view;

HID – Human Interface Device;

PPM – pulse position modulation.

## ВСТУП

У сучасних умовах розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) значно зростає попит на ефективну та безпечну підготовку операторів дронів, зокрема FPV (First Person View) дронів. Управління такими апаратами вимагає високої точності, швидкої реакції та практичних навичок, які складно набути без ризику пошкодження дорогого обладнання. Використання симуляторів польоту є ефективним способом підготовки, однак для досягнення максимального ефекту необхідна точна і реалістична передача керуючих сигналів від реального пульта керування до симуляційного середовища. Саме тому актуальним є розроблення апаратно-програмного модуля, який дозволяє здійснити синхронізацію пульта керування FPV дроном із симулятором на ПК, що забезпечить якісніше навчання операторів і зменшить витрати на матеріальні ресурси.

Мета роботи – покращення навчання операторів FPV дроном, за рахунок розробки модуля підключення пульта керування до симулятора польоту на ПК.

Об'єкт розробки – процес керування FPV дроном.

Предмет розробки – алгоритми, апаратне та програмне забезпечення керування FPV дроном в симуляторі польоту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних пультів керування FPV дроном та їх технічні характеристики;
- провести аналіз програм для симуляції польоту керування FPV дроном;
- провести аналіз існуючих методів та апаратних рішень підключення пульта керування FPV дронами до ПК;

- розробити структурну схему модуля підключення пульта керування FPV дроном;
- провести вибір апаратних модулів та аналіз їх характеристик;
- розробити схему підключення апаратних модулів;
- провести розрахунок ширини та тривалості PPM -імпульсів FlySky FS-I6;
- провести розрахунок стійкості системи керування;
- провести складання макета модуля підключення пульта FlySky FS-I6 до симулятора польоту;
- провести обґрунтування та вибір середовища розробки;
- розробити алгоритм роботи програми;
- розробити програму обробки сигналів з пульта керування FlySky FS-I6 для модуля Arduino Pro Micro;
- провести калібрування та налаштування апаратно-програмного модуля;
- провести експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.

Кваліфікаційну роботу виконано згідно ДСТУ 3008 – 15 [1] та керуючись навчальним посібником з написання кваліфікаційної роботи бакалавра [2] і методичними вказівками [3]. Результати кваліфікаційної роботи отримали апробацію на науковій конференції [4].

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПУЛЬТІВ КЕРУВАННЯ FPV ДРОНОМ ТА СИМУЛЯТОРІВ ПОЛЬОТУ

## 1.1 Аналіз сучасних пультів керування FPV дроном та їх технічні характеристики

У процесі підготовки операторів FPV дронів важливу роль відіграє вибір пульта керування, адже саме він забезпечує повноцінний зв'язок між користувачем і безпілотним літальним апаратом. Сучасні пульти керування відрізняються широким спектром технічних характеристик, протоколів зв'язку, форм-факторів та можливостей кастомізації, що дозволяє адаптувати їх під різні сценарії використання – як для реальних польотів, так і для симуляторів. Проведемо аналіз кількох популярних моделей, що використовуються як у реальних польотах, так і в симуляторах, їхніх технічних особливостей, функціональних можливостей, а також переваг і недоліків кожної з моделей [5-6].

Пульт FrSky Taranis X9D Plus 2019 – оновлений варіант одного з найпопулярніших пультів у світі FPV, орієнтований на професійних пілотів. Цей пристрій оснащено потужним процесором STM32 F407, який забезпечує високу швидкість обробки даних та стабільність роботи. Основною перевагою є підтримка нового протоколу ACCESS, який забезпечує кращу швидкодію, надійність та розширені можливості телеметрії порівняно з попереднім ACCST. Пульт підтримує до 24 каналів, що дозволяє використовувати його для складних сценаріїв управління, а інтерфейс користувача реалізовано за допомогою прошивки OpenTX – гнучкої та відкритої системи, яка дає змогу детально налаштовувати функції пристрою під особисті потреби. Фізично пульт має міцний корпус, зручну ергономіку та велику кількість програмованих перемикачів, поворотних енкодерів і

слайдерів. РК-дисплей з підсвічуванням дозволяє комфортно працювати за будь-яких умов освітлення, а голосові сповіщення та вібрація забезпечують зворотний зв'язок під час польоту. Стандартна комплектація дозволяє використовувати акумулятори типу 2S LiPo або два елементи 18650, що забезпечують тривалий час автономної роботи. Крім того, пульт має порт mini USB для підключення до ПК або заряджання, а також слот для SD-карти, на якій зберігаються налаштування та звукові файли [7].

RadioMaster TX16S – це високотехнологічний багатопротокольний пульт керування, який вирізняється універсальністю та розширеним функціоналом, оснащений кольоровим 4.3-дюймовим TFT-дисплеєм із високою роздільною здатністю, він підтримує як OpenTX, так і EdgeTX прошивки, що дозволяє повністю адаптувати систему під потреби користувача. Завдяки вбудованому модулю "4-в-1" (CC2500, NRF24L01, A7105, CYRF6936), пульт сумісний з понад 40 протоколами, включаючи FrSky, FlySky, Spektrum, Futaba та інші, що робить його універсальним рішенням як для FPV-дронів, так і для авіамоделей. Стики на Hall-сенсорах забезпечують плавну та точну реакцію на рухи, а сенсорний екран (у версії TX16S Hall) спрощує налаштування, додатково пульт має підтримку телеметрії, Bluetooth, USB-C для підключення до ПК та слот для SD-карти. Зручна ергономіка, тривала автономна робота, а саме від 2S Li-Ion або 18650 і активна підтримка спільноти роблять TX16S одним з найкращих варіантів на ринку [8].

Одним з популярних пультів є FlySky FS-i6X, доступний і простий у використанні пульт керування, який ідеально підходить для новачків. За допомогою оновлення прошивки він підтримує до 10 каналів та працює на надійному протоколі зв'язку AFHDS 2A, який забезпечує стабільну передачу сигналу на відстань до 1 км. Оснащений монохромним LCD-дисплеєм з роздільною здатністю 128 x 64 пікселі, пульт дозволяє легко змінювати налаштування прямо з меню. Живлення здійснюється від чотирьох батарейок

типу AA, що робить його дуже зручним у польових умовах. Незважаючи на свою бюджетність, FS-i6X забезпечує достатню точність керування для базового польоту та навчання, а завдяки підтримці телеметрії й наявності додаткових перемикачів, його можна використовувати і для більш складних завдань [9].

Jumper T16 Pro є багатофункціональним пультом керування з підтримкою десятків протоколів, завдяки вбудованому мультипротокольному модулю, який робить його надзвичайно гнучким у використанні з різними типами дронів та моделей. Цей пульт оснащений 4.3-дюймовим кольоровим TFT-дисплеєм з роздільною здатністю 480 x 272 пікселі, пульт забезпечує зручне керування та інтуїтивну навігацію в меню, що працює на базі OpenTX або JumperTX. У даній моделі реалізовані Hall-сенсорні стики, які підвищують точність і довговічність керування, а також функції голосових сповіщень, вібрації, телеметрії й можливість підключення до ПК через USB для симуляторів. Jumper T16 Pro живиться від 2S LiPo або двох акумуляторів 18650, а корпус із зручною ергономікою й численними перемикачами забезпечує комфортне тримання під час тривалих сесій [10]. На рисунку 1.1 представлено зовнішній вид кожного з пультів, а в таблиці 1.1 представлено порівняння технічних характеристик пультів керування FPV-дронами



a) FrSky Taranis X9D Plus 2019 [7]; б) RadioMaster TX16S [8];  
в) FlySky FS-i6X [9]; г) Jumper T16 Pro [10]

Рисунок 1.1 – Зовнішній вид пультів керування FPV-дронами

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця технічних характеристик пультів керування FPV-дронами

Характер.	FrSky Taranis X9D Plus 2019	Jumper T16 Pro	RadioMaster TX16S	FlySky FS-i6X
Кількість каналів	24	16	16	6-10
Протокол.	ACCST, ACCESS	Multi-protocol	Multi-protocol	AFHDS 2A
Дисплей	LCD, 212x64	TFT, 480 x 272	TFT, 480 x 272	LCD, 128 x 64
Стики	Потенц. / Hall	Hall-сенсорні	Hall-сенсорні	Потенціометр.
Живлення	2S Li-Ion / LiPo	2x18650 / 2S LiPo	2x18650 / 2S LiPo	4xAA
Вага (без акумуля.)	670 г	888 г	750 г	~ 392 г
Прошивка	OpenTX	JumperTX (OpenTX)	EdgeTX	Власна
Особлив.	Голосові сповіщення, вібрація	Багатопроток., великий дисплей	Сенсорний екран, багатопроток.	Простота, доступність

Після проведеного аналізу можна зробити висновки, що найбільш функціональними та гнучкими у використанні є моделі RadioMaster TX16S та Jumper T16 Pro, які підтримують широкий спектр протоколів і мають сенсорні екрани. Водночас, FrSky Taranis X9D Plus залишається еталоном надійності серед професіоналів, а FlySky FS-i6X – хорошим варіантом для новачків завдяки своїй простоті та доступності [7-10].

## 1.2 Аналіз програм для симуляції польоту керування FPV дроном

Симулятори польоту для FPV (First Person View) дронів є важливими інструментами для тренування операторів та тестування навичок без реальних ризиків. Вони дозволяють моделювати польоти в різноманітних умовах, наближених до реальних, без необхідності фізичного використання дронів. Сучасні програми симуляції забезпечують високу точність та реалістичність, що важливо для безпеки й ефективності навчання [11].

Одним з найпопулярніших симуляторів є Liftoff, цей симулятор забезпечує надзвичайно реалістичну фізику польоту і має велику бібліотеку моделей дронів, що дозволяє користувачам випробувати різні типи дронів. Liftoff підтримує широкий спектр контролерів і пультів керування, що робить його ідеальним для інтеграції з реальними пультами, а крім того, у ньому є різноманітні режими, включаючи вільний політ та змагання, що дозволяє користувачам вдосконалювати навички у різних умовах [12].

VelociDrone – ще один популярний симулятор, який також відомий своєю високою реалістичністю, він дозволяє операторам FPV дронів адаптуватися до різних стилів польоту та умов. VelociDrone також підтримує різні типи пультів і пропонує настроювані опції для кожного елемента управління, що дає можливість максимально точно налаштувати систему під реальний апарат [13].

Для більш специфічних умов навчання використовуються такі програми, як DRL Simulator, розроблений Drone Racing League. Цей симулятор створений з урахуванням змагань і дозволяє користувачам практикувати навички гонок на дронах у віртуальному середовищі, а його особливістю є реалістичне моделювання траєкторій польоту під час гонок і можливість порівнювати свої результати з іншими користувачами через онлайн-лідерборди [14].

FPV Freerider є ще одним варіантом симулятора, який є доступним для широкого кола користувачів завдяки своїй простоті та низьким вимогам до апаратного забезпечення. Він підходить для новачків, які хочуть освоїти основи управління FPV дроном перед тим, як перейти до реальних польотів. Цей симулятор має кілька рівнів складності та дозволяє користувачам практикуватися в різних сценаріях [15].

Однією з ключових переваг програм для симуляції польоту є підтримка різних пультів управління. Більшість популярних симуляторів дозволяють підключати реальні пульти через USB або бездротові підключення, що

дозволяє користувачам використовувати знайомі пристрої для тренувань, що є важливим елементом для розвитку навичок в реальних умовах. Не менш важливими є програми, які забезпечують інтеграцію з системами реального часу, де оператори можуть тренуватися в умовах, наближених до реальних. Такі програми дозволяють моделювати конкретні сценарії польоту, наприклад, перешкоди на шляху або погодні умови, що допомагає підготуватися до різноманітних ситуацій.

Сучасні програми для симуляції польоту FPV дронів пропонують широкий спектр можливостей для тренування операторів, завдяки високій реалістичності та інтеграції з реальними пультами, ці програми стають важливим елементом підготовки до реальних польотів, що значно знижує ризики та підвищує ефективність навчання [16].

### 1.3 Аналіз існуючих методів та апаратних рішень підключення пульта керування FPV дронами до ПК

Підключення пультів керування FPV дронів до ПК є важливим елементом симуляції польотів, що дає змогу оператору використовувати реальний пульт для тренувань у віртуальному середовищі. Існує кілька методів і апаратних рішень для здійснення цього підключення, кожен з яких має свої переваги та обмеження [17].

Підключення пульта до ПК через USB є одним з найбільш простих і поширених методів. Більшість сучасних пультів керування FPV дронів, таких як FlySky або FrSky, мають можливість підключення через USB за допомогою спеціальних адаптерів або кабелів, що дозволяє комп'ютеру розпізнати пульт як джойстик або контролер, що дає змогу використовувати пульт у симуляторах польотів. Процес налаштування часто обмежується підключенням та встановленням необхідних драйверів. Перевагою цього методу є його простота і зручність, оскільки не потрібно додаткових

налаштувань або обладнання, однак, недоліком є обмеження довжини кабелю, що може бути незручним для більш вільних рухів під час тренувань.

Бездротове підключення через частоту 2,4 ГГц є популярним методом для інтеграції пультів керування з ПК. Цей метод забезпечує більшу свободу дій порівняно з підключенням через USB, оскільки оператор не обмежений довжиною кабелю. Пульти, такі як FrSky Taranis, використовують бездротові сигнали для передачі даних до ПК через спеціальні USB приймачі, які підключаються до комп'ютера, таке підключення дозволяє оператору вільно переміщатися на більшу відстань від ПК, що є важливим для тренувань. Однак, бездротовий зв'язок може бути схильний до перешкод, що може призвести до втрати сигналу або затримок у передачі даних, особливо в умовах великої кількості бездротових пристроїв у навколишньому середовищі.

Ще одним бездротовим методом підключення пультів до ПК є Bluetooth, що зазвичай застосовується в менш потужних пультах або для зручності використання з невеликими тренувальними пультами. Пульти, такі як Spektrum DX6, можуть підключатися до ПК через Bluetooth-адаптери, що дозволяє знизити кількість дротів, а також спростити підключення. Однак Bluetooth має свої обмеження, так як передача сигналу зазвичай стабільна тільки на коротких відстанях, і може виникати зниження якості з'єднання, якщо сигнал зустрічає перешкоди. Також Bluetooth може мати обмеження щодо кількості пристроїв, з якими може стабільно працювати, що може бути важливим при більш складних умовах тренувань.

Підключення через програмне забезпечення є одним з найпростіших способів інтеграції пультів до ПК, де пульт працює як джойстик. Багато пультів підтримують спеціальні драйвери або програмні пакети, які дозволяють їм функціонувати з симуляторами польотів без необхідності додаткових апаратних адаптерів, що дозволяє оператору використовувати пульт без проводів або інших апаратних з'єднань, оскільки всі необхідні

налаштування здійснюються програмно. Наприклад, за допомогою програм для симуляторів, таких як FMS Simulator, пульт можна підключити через драйвери, що автоматично перетворюють його в джойстик. Однак цей метод також має свої обмеження, так як для кожного пульта необхідно встановлювати відповідні драйвери, і не всі пульти можуть бути підтримані різними програмами, що може ускладнити процес налаштування або зробити його менш універсальним для різних платформ [18-19].

Представимо порівняння основних методів та апаратних рішень підключення пультів керування до ПК та оформимо у вигляді таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння основних методів та апаратних рішень підключення пультів керування до ПК

Метод підключення	Переваги	Недоліки	Приклад використання
USB-інтерфейс	Простота налаштування, без додаткових перешкод	Потрібен адаптер або драйвер для пульта	FlySky, Turnigy, FrSky через USB-адаптер
Бездротове підключення (2,4 ГГц)	Без обмежень по довжині кабелю, зручність у використанні	Може бути проблема з інтерференцією сигналу або затримками	FrSky Taranis через USB приймач
Bluetooth-підключення	Бездротове з'єднання, зручність використання	Може бути низька стабільність сигналу на великій відстані	Spektrum DX6 через Bluetooth адаптер
Підключення через програмне забезпечення	Не потребує додаткового апаратного забезпечення	Потрібна специфічна програмна підтримка для кожного пульта	FMS Simulator (підтримує різні пульти через програму)

Існуючі методи підключення пультів керування FPV дронів до ПК мають свої переваги та недоліки, що визначає вибір найбільш підходящого варіанту в залежності від конкретних вимог користувача та умов експлуатації. Підключення через USB є найпростішим і найбільш надійним

методом, однак обмежене довжиною кабелю, що може бути незручним при необхідності великих переміщень. Бездротове підключення через 2,4 GHz дозволяє більше свободи в русі, але може бути піддане перешкодам у середовищі з великою кількістю пристроїв. Bluetooth забезпечує зручність використання без дротів, але має обмежену дальність і може знижувати стабільність з'єднання. Підключення через програмне забезпечення є зручним та простим методом для користувачів, які не хочуть використовувати додаткове апаратне забезпечення, але має обмеження щодо підтримки конкретних моделей пультів і програм. Вибір між цими методами залежить від вимог до мобільності, стабільності з'єднання та доступного обладнання [20].

## **2 РОЗРОБКА АПАРАТНОГО МОДУЛЯ ПІДКЛЮЧЕННЯ ПУЛЬТА FLYSKY ДО СИМУЛЯТОРА ПОЛЬОТУ**

### **2.1 Розробка структурної схеми модуля підключення пульта керування FPV дроном**

Розробка структурної схеми модуля підключення пульта керування FPV дроном до ноутбука або ПК є необхідною для створення ефективної системи навчання та тренування операторів FPV дронів. В умовах стрімкого розвитку дронів і їх застосування в різних сферах, таких як промисловий моніторинг, пошуково-рятувальні операції та спортивні змагання, важливо забезпечити можливість безпечного та ефективного відпрацювання навичок пілотування без ризику пошкодження реального обладнання. Такий модуль дозволяє оператору взаємодіяти з тренувальним програмним забезпеченням, що імітує поведінку дрона в реальних умовах, використовуючи стандартний FPV-пульт. Це дає змогу адаптувати новачків до особливостей керування, а досвідченим пілотам – вдосконалювати навички в складних сценаріях. Крім того, симуляція керування допомагає зменшити витрати на ремонт та заміну комплектуючих, оскільки дозволяє уникати аварій у процесі навчання. Структурна схема такого модуля повинна включати інтерфейси підключення пульта до ПК, програмні компоненти для обробки сигналів керування та інтеграцію з візуальним відображенням польоту. Це дозволяє створити максимально реалістичну систему керування, яка враховує затримки сигналу, чутливість органів управління та алгоритми стабілізації польоту. Використання такого модуля сприяє стандартизації підходів до навчання операторів FPV дронів та створює передумови для розробки уніфікованих тренувальних програм. Окрім цього, можливість аналізу дій оператора та коригування його навичок у реальному часі дозволяє прискорити процес

навчання та зробити його більш ефективним. Враховуючи розвиток дистанційного керування дронами у військових і комерційних сферах, необхідність розробки подібних тренувальних систем стає особливо актуальною. На базі проведеного аналізу у першому розділу, пропонується наступна структурна схема модуля підключення пульта керування FPV дроном до ноутбука або ПК, яка приведена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Розроблена структурна схема модуля підключення пульта керування FPV дроном до ноутбука або ПК

Принцип роботи даної структурної схеми базується на підключенні пульта керування FPV дроном FlySky FS-I6 до ПК або ноутбука через спеціальний модуль обробки сигналів. Пульт керування передає сигнали управління у вигляді аналогових або цифрових імпульсів через вихідні контакти SIG/GND, які надходять до мікроконтролера модуля підключення. Мікроконтролер приймає ці сигнали, обробляє їх та перетворює у формат, сумісний з ПК. Програма обробки сигналів, вбудована в модуль, інтерпретує вхідні дані та адаптує їх для передачі через USB-інтерфейс (USB 2.0/USB 3.0) до комп'ютера. На рівні операційної системи комп'ютера ці дані сприймаються як команди джойстика або іншого пристрою введення, що дозволяє інтегрувати їх у програмне забезпечення симулятора польотів. Завдяки цьому оператор отримує можливість керувати віртуальним дроном у реальному часі, використовуюючи стандартний пульт без додаткових змін у

його конструкції. Такий підхід дозволяє імітувати керування справжнім дроном, зберігаючи всі тонкощі роботи з реальним обладнанням, включаючи чутливість ручок управління, затримки реакції та особливості стабілізації.

Головними перевагами даного рішення є простота та універсальність підключення без необхідності модифікації апаратної частини пульта FlySky FS-I6. Завдяки використанню мікроконтролера та спеціального програмного забезпечення оператор отримує повний контроль над процесом тренувань у симуляторі, що дозволяє значно зменшити ризики пошкодження реального дрона під час навчання. Крім того, можливість підключення через USB забезпечує високу сумісність з різними операційними системами та симуляторами, а також мінімізує затримки в обробці сигналів. Використання даної схеми дає змогу не тільки навчатися новачкам, а й покращувати навички досвідчених пілотів у безпечному середовищі, що робить тренування більш ефективними та економічно вигідними.

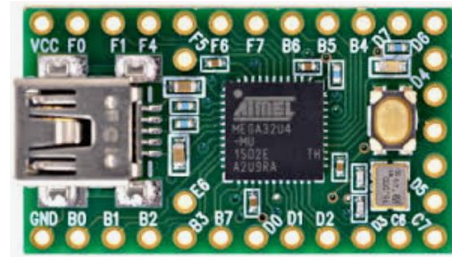
## 2.2 Вибір апаратних модулів та аналіз їх характеристик

Модуль підключення пульта керування FPV дроном FlySky FS-I6 до ноутбука або ПК повинен бути компактним пристроєм, побудованим на базі мікроконтролера, що підтримує режим HID (Human Interface Device). Це дозволить підключати його через USB без необхідності встановлення додаткових драйверів, щоб операційна система Windows розпізнавала його як стандартний USB-контролер. Мікроконтролер модуля повинен мати достатню кількість входів для прийому сигналів SIG/GND з пульта керування, забезпечувати аналого-цифрове або цифрове перетворення сигналів, а також коректно передавати їх у вигляді команд HID-пристрою. Конструкція модуля повинна передбачати можливість стабільного живлення від порту USB 5 В без потреби у додаткових джерелах живлення.

Модуль має бути призначений для використання у приміщеннях з робочою температурою від  $+ 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+ 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  та відносною вологістю не більше 80 %. Корпус повинен бути стійким до механічних впливів, мати достатню екранованість для зменшення електромагнітних завад. Електричне споживання не повинно перевищувати 500 мА для сумісності зі стандартними USB-портами. Важливою вимогою є низька затримка передачі сигналів, щоб забезпечити реалістичність управління дроном у симуляторі. Інтерфейс модуля повинен підтримувати емуляцію джойстика або геймпада для максимальної сумісності із популярними симуляторами польотів. Відповідно вище перерахованим технічним та експлуатаційним умовам, було обрано наступні мікроконтролерні модулі, загальний вид яких представлено на рисунку 2.2.



а)



б)



в)



г)

а) Arduino Pro Micro [21];

б) Teensy++ 2.0 [22];

в) STM8S103F3P6 [23];

г) RP2040 (Raspberry Pi Pico) [24]

Рисунок 2.2 – Загальний вид мікропроцесорних модулів

Порівняння технічних характеристик мікропроцесорних модулів: Arduino Pro Micro, Teensy++ 2.0, STM8S103F3P6 та RP2040 (Raspberry Pi Pico) приведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння технічних характеристик мікропроцесорних модулів: Arduino Pro Micro, Teensy++ 2.0, STM8S103F3P6 та RP2040 (Raspberry Pi Pico)

Характеристика	Мікропроцесорні модулі			
	Arduino Pro Micro	Teensy++ 2.0	STM8S103F3P6	RP2040 (Raspberry Pi Pico)
Мікроконтролер	ATmega32U4	AT90USB1286	STM8S103F3P6	RP2040 (Dual-core Cortex-M0+)
Тактова частота	16 МГц			133 МГц
Розрядність CPU	8 біт			32 біти
ОЗП (RAM)	2,5 КБ	8 КБ	1 КБ	264 КБ
Флеш-пам'ять	32 КБ (з них 4 КБ для Bootloader)	128 КБ	8 КБ	2 МБ
USB HID підтримка	Так	Так	Ні	Так
Кількість GPIO	12 цифрових, 9 аналогових	46 цифрових	16 цифрових	26 цифрових
ШИМ (PWM) канали	5	9	4	16
Інтерфейси	UART, I2C, SPI	UART, I2C, SPI	UART, I2C, SPI	2 × UART, 2 × I2C, 2 × SPI, PIO
Живлення	5 В / 3,3 В	5 В	3,3 В	3,3 В
Максимальний струм GPIO	40 мА на пін	25 мА на пін	20 мА на пін	12 мА на пін
Ціна (орієнтовна)	~ 6-10 USD	~ 20-25 USD	~ 1-2 USD	~ 4-8 USD

Вибір Arduino Pro Micro для реалізації модуля підключення пульта керування FlySky FS-I6 до ноутбука або ПК обґрунтований його технічними характеристиками, які оптимально відповідають вимогам проекту. Першочергово, він має вбудовану підтримку USB HID, що дозволяє підключатися до ПК без додаткових драйверів і розпізнаватися операційною системою як стандартний пристрій введення. На відміну від STM8S103F3P6, який не підтримує HID і має лише 1 КБ оперативної пам'яті, Arduino Pro Micro оснащений 2,5 КБ ОЗП, що дозволяє ефективніше обробляти сигнали з пульта. Також у порівнянні з Teensy++ 2.0, який має більше GPIO і пам'яті, Arduino Pro Micro є більш компактним (34 мм × 18 мм проти 50 мм × 17 мм) і значно дешевшим (~ 6-10 USD проти ~ 20-25 USD), що робить його економічно доцільним вибором. Хоча RP2040 є найпотужнішим варіантом із 133 МГц тактової частоти та 264 КБ ОЗП, він має складніший процес налаштування HID, тоді як ATmega32U4 у Arduino Pro Micro підтримує його на рівні апаратури. Таким чином, Arduino Pro Micro є ідеальним балансом між функціональністю, вартістю та простотою інтеграції, що робить його найкращим вибором для реалізації модуля підключення пульта керування FPV дроном до ПК [21-24].

### 2.3 Розробка схеми підключення апаратних модулів

Розробка схеми підключення апаратних модулів Arduino Pro Micro та модуля керування FlySky FS-I6 до ноутбука або ПК є необхідною для забезпечення ефективного та доступного способу тренування операторів FPV дронів у симуляторах польотів. Оскільки FlySky FS-I6 передає керуючі сигнали у вигляді аналогових або цифрових імпульсів через PPM або PWM-виходи, необхідно створити інтерфейс для конвертації цих сигналів у формат, який може бути розпізнаний комп'ютером як стандартний HID-контролер. Використання Arduino Pro Micro виправдане тим, що він має

вбудовану підтримку USB HID, що дозволяє йому працювати як джойстик або іншій пристрій введення без додаткових драйверів. Це забезпечує сумісність з популярними симуляторами польотів і спрощує процес інтеграції. Відсутність такого модуля змушує користувачів купувати спеціальні USB-адаптери, які можуть бути дорогими або не підтримувати всі функції пульта керування. Реалізація власного рішення дозволяє адаптувати систему під індивідуальні потреби та забезпечити низьку затримку обробки сигналів. Також важливо враховувати, що така схема може бути використана не лише для симуляторів, а й для керування іншими пристроями, наприклад, робототехнічними системами або безпілотними платформами, що значно розширює її функціональні можливості.

Для розробки схеми підключення буде використовуватися CAD Fritzing. Вибір Fritzing як CAD-системи для розробки схеми підключення модуля керування FlySky FS-I6 до ноутбука або ПК обґрунтований його зручністю для швидкого прототипування та візуалізації з'єднань між електронними компонентами. Ця програма підтримує графічне відображення модулів Arduino, зокрема Arduino Pro Micro, що дозволяє легко створювати зрозумілі схеми без необхідності глибоких знань складних САПР-систем. Важливою перевагою є велика бібліотека компонентів, серед яких можна знайти як сам пульт FlySky FS-I6, так і необхідні інтерфейси для підключення PPM або PWM сигналів. Крім того, Fritzing дозволяє не лише проектувати схеми, а й створювати макет друкованої плати для подальшого виготовлення, що спрощує перехід від прототипу до робочого пристрою. Завдяки інтуїтивному інтерфейсу, програму можуть ефективно використовувати як досвідчені розробники, так і новачки, що робить її гарним вибором для швидкої реалізації проекту. Розроблена схема підключення пульта керування FlySky FS-I6 FPV дроном до ноутбука або ПК, приведена на рисунку 2.3.

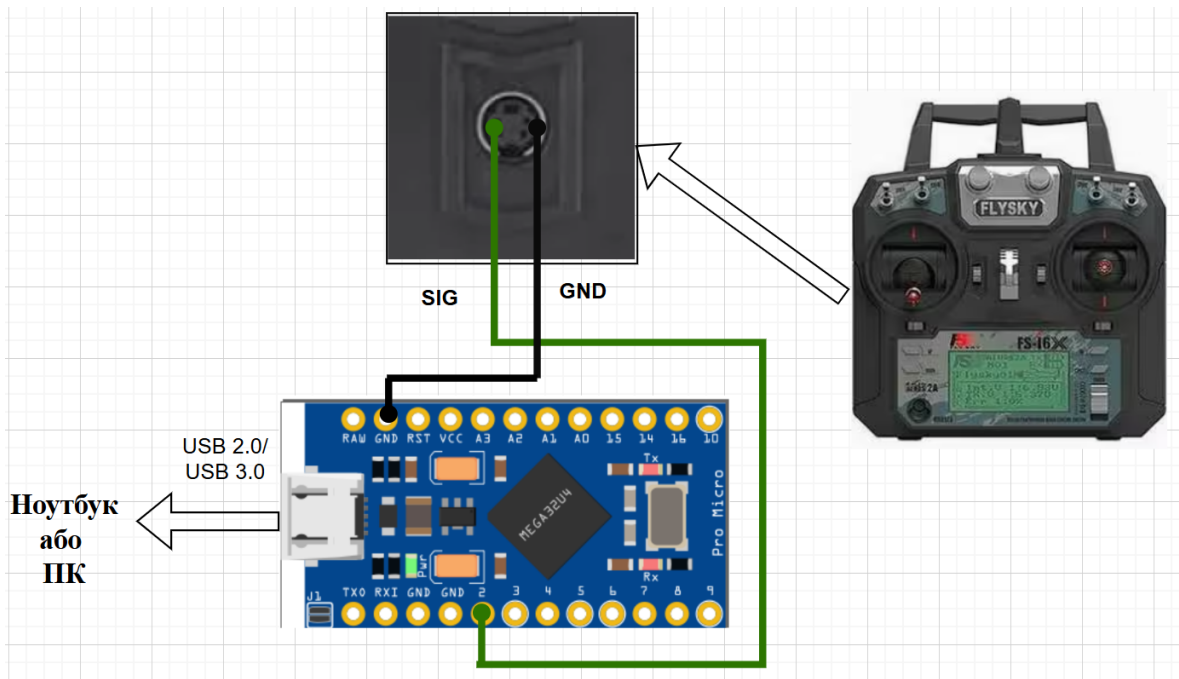


Рисунок 2.3 – Розроблена схема підключення пульта керування FlySky FS-I6 FPV дроном до ноутбука або ПК

Принцип роботи схеми підключення пульта FlySky FS-I6 через інтерфейс PWM-сигналів (SIG та GND) до Arduino Pro Micro базується на зчитуванні широтно-імпульсних сигналів, які надходять від пульта керування та перетворюються в цифрові команди для подальшої обробки на ПК. Пульт передає сигнали у вигляді PWM-імпульсів, де ширина імпульсу відповідає положенню відповідного каналу керування. Ці сигнали надходять на один із входів Arduino Pro Micro, який виступає у ролі аналого-цифрового перетворювача та інтерфейсу між пультом і комп'ютером. За допомогою спеціальної бібліотеки мікроконтролер розпізнає ширину імпульсів та інтерпретує їх як команди керування, які потім передаються через USB у форматі HID (Human Interface Device), дозволяючи ПК сприймати пристрій як стандартний ігровий контролер без необхідності встановлення додаткових драйверів. Це дозволяє використовувати пульт FlySky FS-I6 для керування FPV-дроном у симуляторах або реальних умовах безпосередньо через комп'ютер, підвищуючи точність і зручність керування.

## 2.4 Розрахунок ширини та тривалості PPM -імпульсів FlySky FS-I6

Розрахунок ширини та тривалості PPM-імпульсів FlySky FS-I6 є необхідним етапом перед розробкою програми для мікроконтролера ATmega32U4, оскільки він дозволяє правильно обробляти керуючі сигнали від передавача. Знання параметрів імпульсів допомагає налаштувати таймери мікроконтролера для точного визначення довжини сигналу, що критично важливо для коректного зчитування команд. Це також дозволяє налаштувати порогові значення для кожного каналу управління та уникнути помилкової інтерпретації сигналу. Крім того, правильне розпізнавання PPM-сигналу забезпечує точне керування підключеними пристроями, такими як серводвигуни або двигуни постійного струму. Невірний розрахунок може призвести до некоректного реагування системи на команди користувача або навіть її повного виходу з ладу. Також ці розрахунки дозволяють оцінити максимальну швидкість оновлення сигналів і визначити, чи потрібно використовувати зовнішні бібліотеки або апаратне переривання для їх обробки. Це важливо для мінімізації затримок при передачі команд і забезпечення стабільної роботи всього комплексу керування.

Серія імпульсів PPM (Pulse Position Modulation, модуляція положення імпульсів) – це метод передачі даних, при якому інформація кодується шляхом зміни положення імпульсів у фіксованому часовому інтервалі. У випадку радіоуправління, такого як пульт FlySky FS-I6, PPM сигнал містить послідовність імпульсів, кожен з яких відповідає певному каналу керування, а їхня довжина змінюється в межах від 1000 мікросекунд до 2000 мікросекунд, залежно від положення джойстика. Серія імпульсів завжди починається з синхронізаційного імпульсу тривалістю понад 3000 мікросекунд, після якого слідує імпульси каналів, що передають значення керуючих параметрів. Загальний період серії імпульсів зазвичай становить 20

мілісекунд, що відповідає стандартній частоті оновлення сигналу 50 Гц. Серія імпульсів PPM для пульта FlySky FS-I6 приведено на рисунку 2.4.

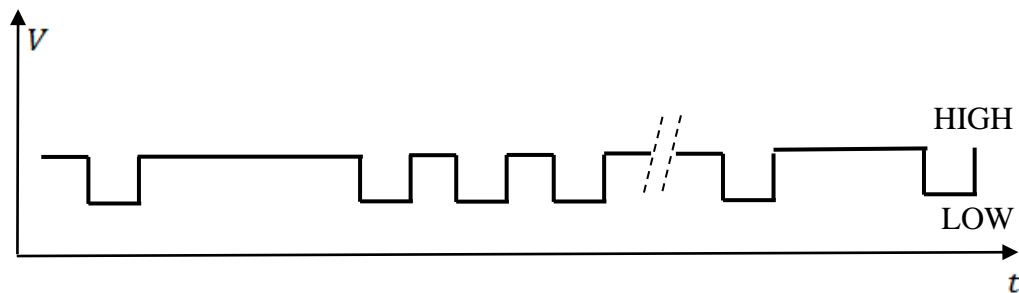


Рисунок 2.4 – Серія імпульсів PPM

На основі рисунка 2.4 видно, що пульт передає сигнали у форматі PPM, де один імпульс відповідає одному каналу керування. Проведемо наступні розрахунки:

– визначення ширини імпульсу для конкретного положення джойстика (тривалість каналного імпульсу):

$$T_{channel} = 1000 + (X / X_{max}) \cdot 1000, \quad (2.1)$$

де  $T_{channel}$  – ширина імпульсу для даного положення (мкс);

$X$  – положення джойстика (0 – мінімальне,  $X_{max}$  – максимальне);

$X_{max}$  – максимальне значення діапазону (зазвичай 255 або 1023);

– синхронізаційний імпульс триває більше 3000 мкс, що визначає початок нового циклу передачі даних. Загальний період передачі для 6-канального пульта FlySky FS-I6 буде наступний:

$$T_{PPM} = 6 \cdot T_{channel} + T_{sync}, \quad (2.2)$$

де  $T_{PPM}$  – загальний час циклу;

$T_{sync}$  – тривалість синхро-імпульсу (> 3000 мкс);

– частота передача PPM сигналу займає в середньому 22 мс (при 6 каналах), то частота передачі команд:

$$f_{ppm} = 1 / T_{ppm} = 1 / 22 \approx 45,5 \text{ Гц.} \quad (2.3)$$

PWM-імпульси FlySky FS-I6 змінюються у діапазоні 1000-2000 мкс для кожного каналу, а загальний цикл передачі PPM для 6 каналів становить приблизно 22 мс, що відповідає частоті оновлення  $\approx 45$  Гц.

## 2.5 Розрахунок стійкості системи керування

Передаточна функція системи підключення пульта керування FlySky FS-I6 до ПК через Arduino Pro Micro може бути представлена у вигляді системи автоматичного керування (САК) з урахуванням основних етапів перетворення сигналу. Опис структури керування приведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Опис структури керування

Елемент структури керування	Опис
Пульт керування FlySky FS-I6	формує сигнал PPM; вихідний сигнал $U_{PPM}(t)$ .
Arduino Pro Micro	приймає PPM сигнал; оцифровує значення (через АЦП або таймери); передає дані в USB HID (Human Interface Device) або UART (Serial) на ПК; вихідний сигнал $U_{USB}(t)$ .
ПК (Програмне забезпечення)	отримує та інтерпретує команди з USB; використовує отримані дані для керування дроном або візуалізації; вихідний сигнал $U_{PC}(t)$ .

Передаточна функція пульта керування. Модель передачі PPM/PWM-сигналу можна наблизити як аперіодичну ланку першого порядку:

$$W_1(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1}, \quad (2.4)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт підсилення (визначає амплітуду сигналу);

$T_1$  – стала часу пульта керування (затримка формування сигналу).

Передаточна функція модуля Arduino Pro Micro. Arduino приймає сигнал, обробляє його та передає через USB, це можна змоделювати як інерційну ланку першого порядку:

$$W_2(s) = \frac{K_2}{T_2 s + 1}, \quad (2.5)$$

де  $K_2$  – коефіцієнт перетворення сигналу (включає оцифрування та передачу в USB);

$T_2$  – затримка обробки сигналу (залежить від швидкості АЦП та USB-інтерфейсу).

Передаточна функція ПК. Комп'ютер приймає сигнал через USB і передає його програмі для аналізу та відображення. Якщо процес моделюється із запізненням, можна використовувати передавальну функцію аперіодичної ланки із затримкою:

$$W_3(s) = K_3 e^{-\tau s}, \quad (2.6)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт перетворення (включає програмну обробку);

$\tau$  – затримка USB-інтерфейсу та ОС.

Загальна передаточна функція системи, з урахуванням всіх етапів, загальна передаточна функція системи підключення пульта до ПК через Arduino виглядає так:

$$W_{total}(s) = W_1(s)W_2(s)W_3(s) = \frac{K_1}{T_1s + 1} \cdot \frac{K_2}{T_2s + 1} \cdot K_3 e^{-\tau s} \quad (2.7)$$

Передаточна функція (2.7) дозволяє провести аналіз стійкості системи керування, а також оцінити динамічні характеристики (перехідний процес, запас стійкості тощо).

Проведемо оцінку стійкості розробленої системи, за допомогою побудування:

- перехідної характеристики (оцінка часу регулювання);
- АЧХ (Амплітудно-частотна характеристика) (оцінка запасу стійкості);
- ФЧХ (Фазочастотна характеристика) (оцінка фазового запасу).

Для побудови графіків припустимо наступні вхідні параметри:  $K_1 = 1,2$ ,  $T_1 = 0,05$ ,  $K_2 = 1,2$ ,  $T_2 = 0,05$ ,  $K_3 = 1,2$ ,  $T_3 = 0,05$ . Результати моделювання перевірки розробленої системи керування на стійкість, приведено на рисунках 2.5-2.6.

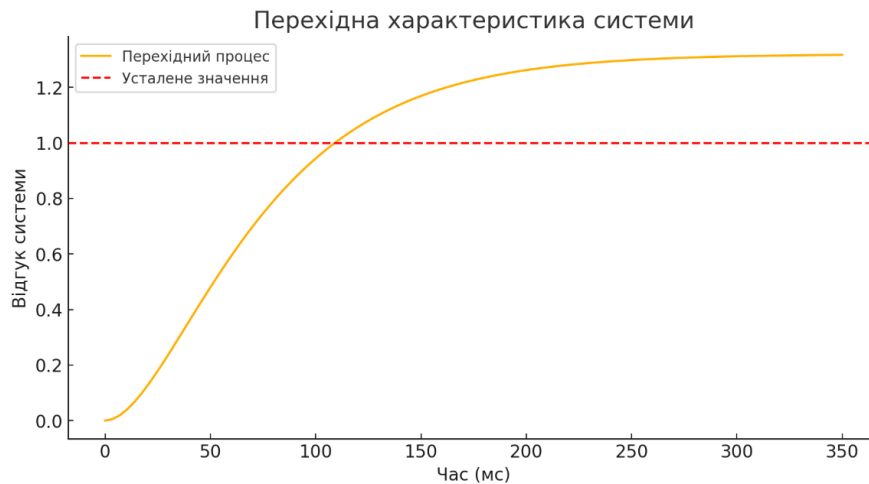


Рисунок 2.5 – Графік передаточної характеристики системи

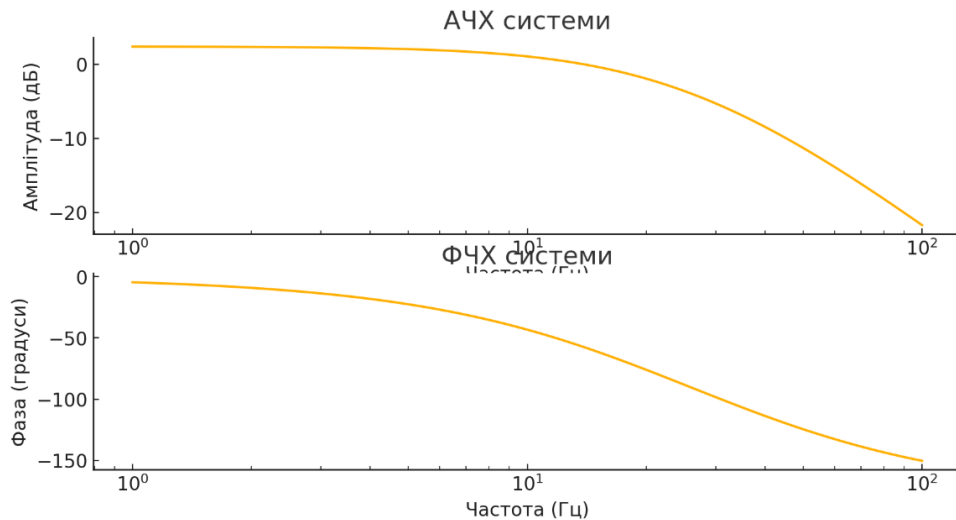


Рисунок 2.6 – АЧХ та ФЧХ системи

Аналіз отриманих графіків перехідного процесу, амплітудно-частотної (АЧХ) та фазочастотної (ФЧХ) характеристик показує, що система має значну інерційність, оскільки час регулювання складає приблизно 106,06 мс, що значно перевищує заданий критерій у 0,22 мс. Перехідна характеристика демонструє плавний вихід на усталене значення, однак швидкість реакції недостатня для ефективної роботи керуючої системи. Аналіз АЧХ вказує на обмежену пропускну здатність системи, що може спричинити затримки в обробці сигналів керування. ФЧХ свідчить про наявність фазового зсуву, який може впливати на точність і стійкість системи при реальній експлуатації. Для покращення характеристик необхідно зменшити постійні часу компонентів або підвищити коефіцієнти підсилення, що дозволить зменшити затримки і покращити швидкодію системи, а також забезпечити її стабільну роботу без значного фазового зсуву [25].

2.6 Складання макета модуля підключення пульта FlySky FS-I6 до симулятора польоту

Для перевірки працездатності розробленої схеми та алгоритмів обробки сигналів необхідно створити фізичний макет модуля підключення пульта

FlySky FS-I6 до симулятора польотів. Збірка макета дозволить оцінити коректність передачі керуючих сигналів, стабільність з'єднання та швидкодію системи в реальних умовах експлуатації. У даному підрозділі представлено етапи складання пристрою, підключення компонентів та тестування роботи модуля. Нижче на рисунку 2.7 наведено фото зібраного макета.

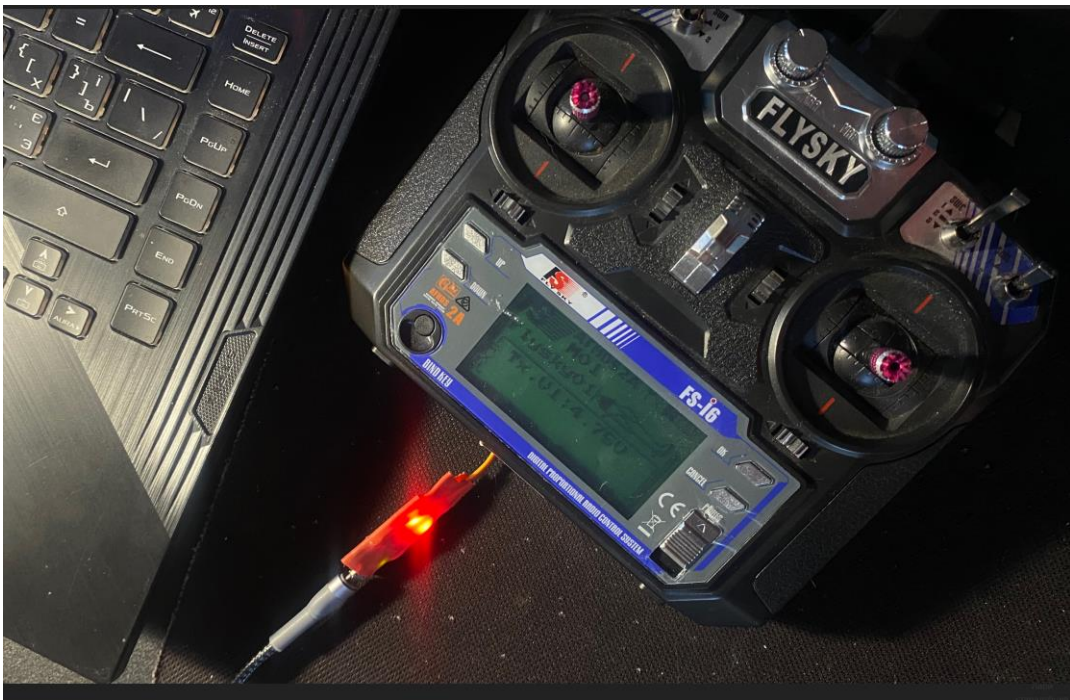


Рисунок 2.7 – Зібраний макет модуля підключення пульта FlySky FS-I6 до симулятора польоту

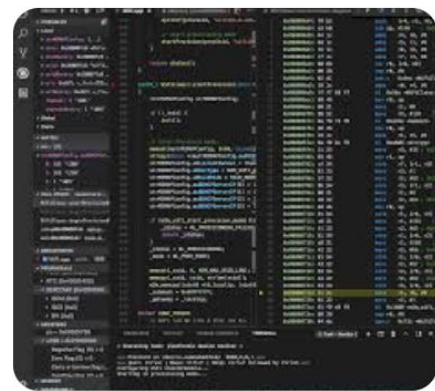
## 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З ПУЛЬТА FLYSKAY ДО СИМУЛЯТОРА ПОЛЬОТУ

### 3.1 Обґрунтування та вибір середовища розробки

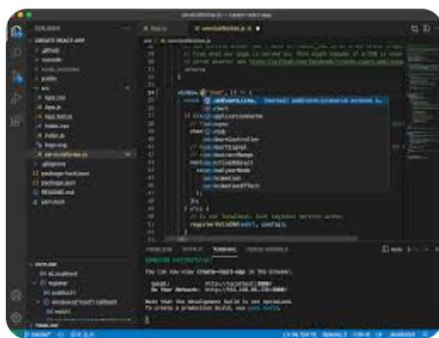
Розробка програм для мікроконтролерного модуля Arduino Pro Micro може виконуватися у кількох середовищах, зокрема Arduino IDE, PlatformIO, Visual Studio Code (з плагіном Arduino) та Atmel Studio. Загальний вид середовищ розробки представлено на рисунку 3.1.



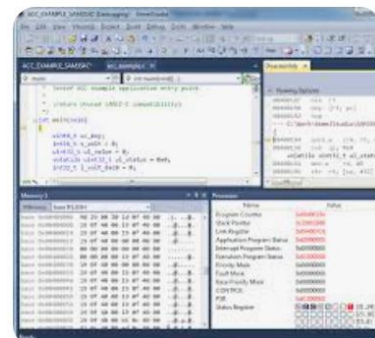
а)



б)



в)



г)

а) Arduino IDE; б) PlatformIO; в) Visual Studio Code (з плагіном Arduino);  
г) Atmel Studio

Рисунок 3.1 – Загальний вид середовищ розробки для мікроконтролерного модуля Arduino Pro Micro

Проведемо порівняння середовищ розробки, їх переваги та недоліки з точки зору розробки програми для мікроконтролерного модуля Arduino Pro Micro:

– Arduino IDE є найпопулярнішим середовищем завдяки простому інтерфейсу, вбудованій підтримці бібліотек та драйверів, а також можливості швидкого компілювання та завантаження програм на мікроконтролер. Його головні переваги – зручність для початківців, велика база прикладів коду та стабільна робота з Arduino-сумісними платами. Проте його недоліками є обмежений функціонал для налагодження коду, відсутність розширених інструментів аналізу та відсутність офіційної підтримки складних інтегрованих проєктів [26];

– PlatformIO є більш гнучким середовищем, яке підтримує Arduino, але орієнтоване на досвідчених розробників. Воно має потужну систему керування бібліотеками, дозволяє працювати з кількома платами одночасно та інтегрується з Visual Studio Code. Його основним недоліком є складність налаштування для початківців [27];

– Visual Studio Code з Arduino-плагіном надає переваги, такі як зручний редактор коду, підтримка Git та можливість використання розширених налагоджувальних функцій, однак потребує додаткових налаштувань та ресурсів [28];

– Atmel Studio орієнтоване на професійних розробників, дозволяє працювати з низькорівневим програмуванням, але є складним у використанні для стандартних Arduino-проєктів [29].

Вибір Arduino IDE обґрунтований тим, що це найпростіше середовище для швидкої розробки, тестування та завантаження коду на Arduino Pro Micro. Воно дозволяє ефективно працювати з бібліотеками, не потребує складних налаштувань і є оптимальним для проєктів, що використовують стандартні функції мікроконтролерів без глибокої оптимізації [26-29].

### 3.2 Розробка алгоритму роботи програми

Розробка алгоритму для мікропроцесорного модуля Arduino Pro Micro є необхідним при створенні макету модуля підключення пульта FlySky FS-I6 до симулятора польоту FPV дронів, оскільки дозволяє забезпечити коректне зчитування, обробку та передачу сигналів від пульта до ПК. Пульт передає сигнали у вигляді PWM- або PPM-імпульсів, які потрібно правильно інтерпретувати та перетворити у формат, сумісний з HID-інтерфейсом USB-джойстика. Без відповідного алгоритму неможливо забезпечити стабільну та точну передачу команд керування в симулятор, що може призвести до затримок, некоректного відображення рухів або втрати сигналу. Алгоритм повинен враховувати часову обробку імпульсів, масштабування значень до діапазону керування джойстиком, а також можливість компенсації можливих похибок сигналу. Це критично для моделювання реальних умов польоту, адже точність керування безпосередньо впливає на якість підготовки пілота. Загальний вид алгоритму програми обробки сигналів з пульта керування FlySky FS-I6 приведено на рисунку 3.2.

Алгоритм роботи програми для модуля Arduino Pro Micro, що обробляє сигнали з пульта FlySky FS-I6 та передає їх до ПК у вигляді HID-джойстика, побудований на основі переривань для забезпечення швидкої та точної обробки імпульсних сигналів. При кожному надходженні імпульсу через зовнішнє переривання мікроконтролер визначає його тривалість, віднімаючи поточний час у мікросекундах від часу попереднього сигналу. Якщо імпульсна пауза перевищує 3 мс, це означає, що передача кадру завершена, і слід обробити зібрані дані. Якщо імпульс знаходиться в діапазоні 800-2200 мкс, він нормалізується у значення від 0 до 1, що відповідає допустимому діапазону керуючих параметрів.

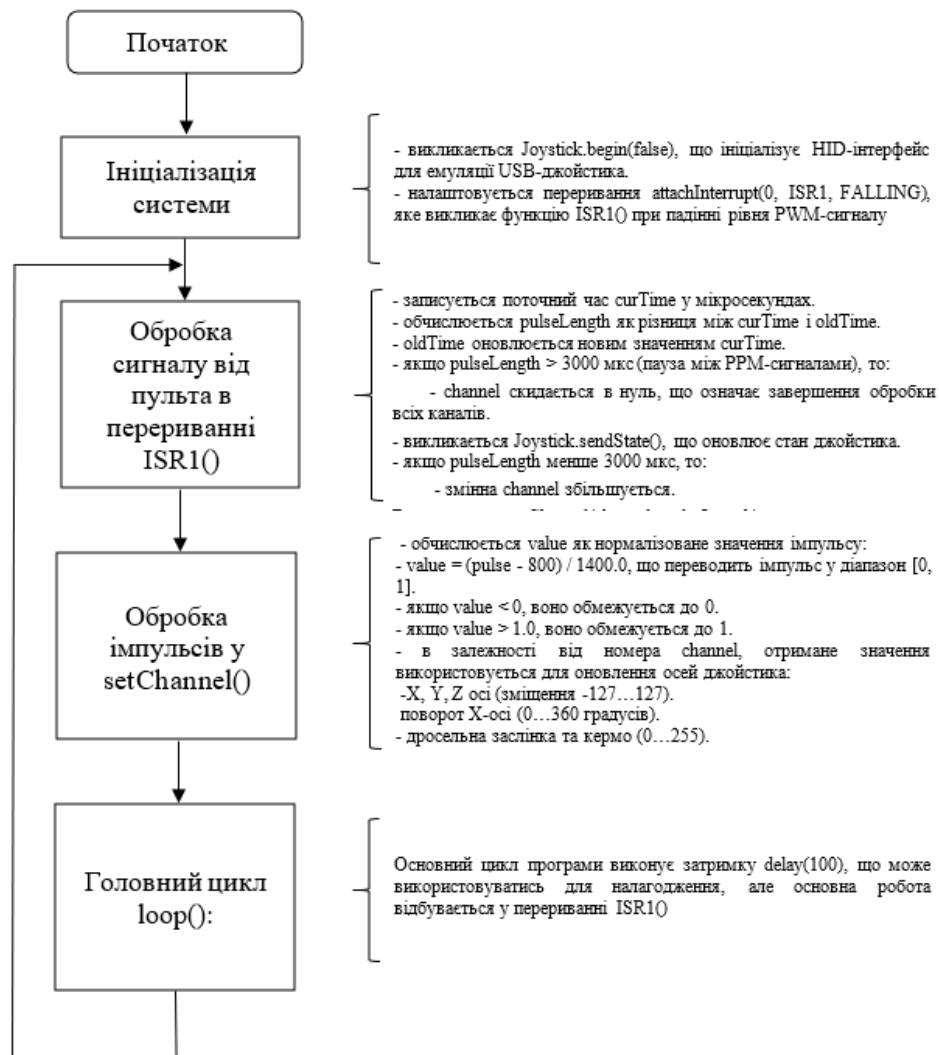


Рисунок 3.2 – Загальний вид алгоритму програми обробки сигналів з пульта керування FlySky FS-I6

Далі, в залежності від номера каналу, значення трансформується у відповідні осі джойстика: X, Y, Z, обертання, дросель або кермо. Таке структурування алгоритму обумовлене необхідністю точної передачі команд керування в режимі реального часу, адже неправильна інтерпретація сигналів або їх затримка можуть негативно позначитися на керованості дрона в симуляторі. Використання механізму переривань дозволяє обробляти PWM-сигнали без затримок, що критично для реалістичного управління. Також застосовується функція `Joystick.sendState()`, яка синхронізує стан джойстика після завершення аналізу кадру, що забезпечує стабільну та безперервну передачу команд у ПК.

### 3.3 Розробка програми обробки сигналів з пульта керування FlySky FS-I6 для модуля Arduino Pro Micro

При розробці програми для обробки сигналів з пульта керування FlySky FS-I6 для модуля Arduino Pro Micro та передачі їх у симулятор польотів через HID-пристрій необхідно враховувати кілька важливих особливостей. По-перше, потрібно правильно обробляти вхідні PPM-імпульси, враховуючи їхню тривалість, частоту та порядок надходження каналів, щоб уникнути помилок у визначенні команд керування. По-друге, слід забезпечити коректне масштабування отриманих значень до діапазону, який відповідає стандартам HID-джойстика, щоб симулятор міг правильно інтерпретувати команди. По-третє, важливо мінімізувати затримки в обробці сигналів, використовуючи переривання, що дозволяє забезпечити швидке реагування системи та точне передавання команд у режимі реального часу. Крім того, слід уникати шумів та перешкод у сигналі, реалізуючи фільтрацію значень або обмежуючи діапазон можливих помилкових даних. Окремо необхідно врахувати особливості взаємодії з операційною системою ПК та драйверами HID, щоб уникнути конфліктів та забезпечити правильне розпізнавання пристрою як джойстика. В наслідок чого, була розроблена наступна програма для мікропроцесорного модуля Arduino Pro Micro, яка представлена нижче:

```
#define PPM_PIN 2 // Визначаємо вхідний пін Arduino для отримання
PPM-сигналу

#include <Joystick.h>

Joystick_ Joystick; // Створюємо об'єкт класу Joystick для передачі
сигналів у ПК

unsigned long curTime = 0;
unsigned long oldTime = 1;
volatile int pulseLength = 0;
```

```
volatile int channel = 0; // Змінні для вимірювання довжини імпульсів і
визначення каналу
```

```
// Обробник переривання для вимірювання довжини PPM-імпульсів
void ISR1()
{
    curTime = micros(); // Отримуємо поточний час у мікросекундах
    pulseLength = curTime - oldTime; // Обчислюємо тривалість імпульсу
    oldTime = curTime; // Оновлюємо попередній час

    if (pulseLength > 3000) { // Якщо імпульс довший за 3 мс, це
синхросигнал
        channel = 0; // Скидаємо номер каналу
        Joystick.sendState(); // Передаємо оновлені дані джойстика у ПК
    } else {
        channel++; // Переходимо до наступного каналу
        setChannel(channel, pulseLength); // Викликаємо функцію обробки
каналу
    }
}
```

```
// Функція конвертації довжини імпульсу у значення для джойстика
void setChannel(int ch, int pulse)
{
    // Обчислюємо значення у діапазоні від 0 до 1 на основі ширини
імпульсу
    float value = (pulse - 500) / 1400.0;

    if (value < 0)
```

```

    value = 0;
else if (value > 1.0)
    value = 1.0;

switch(ch) {
    case 2:
        Joystick.setYAxis(value*255 - 127); // Призначаємо значення осі Y
джойстика
        break;

    case 3:
        Joystick.setThrottle(value*255); // Призначаємо значення газу
(Throttle)
        break;

    case 1:
        Joystick.setXAxis(value*255 - 127); // Призначаємо значення осі X
джойстика
        break;

    case 4:
        Joystick.setRzAxis(value*360); // Призначаємо значення обертання
навколо Z
        break;

    case 5:
        Joystick.setRxAxis(value*360); // Призначаємо значення обертання
навколо X
        break;

```

```

    case 6:
        Joystick.setRyAxis(value*360); // Призначаємо значення обертання
навколо Y
        break;
    }
}

void setup()
{
    pinMode(PPM_PIN, INPUT_PULLUP); // Налаштовуємо пін PPM як
вхідний із підтягуючим резистором
    Joystick.begin(false); // Ініціалізуємо об'єкт Joystick без автоматичного
оновлення
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PPM_PIN), ISR1, FALLING); //
Налаштовуємо переривання на падіння сигналу
}

void loop()
{
    delay(100); // Затримка у 100 мс (запас для налагодження коду)
}

```

Розроблена програма має кілька важливих переваг, які роблять її ефективним рішенням для підключення пульта FlySky FS-I6 до симулятора польотів через Arduino Pro Micro. По-перше, вона використовує переривання для обробки сигналів, що забезпечує високу швидкість реакції та зменшує затримки у передачі команд, роблячи управління дроном у симуляторі більш реалістичним. По-друге, алгоритм автоматично масштабує значення ширини імпульсів у відповідні діапазони HID-джойстика, що дозволяє безпосередньо взаємодіяти з різними програмами без додаткового калібрування. Також

програма підтримує декілька каналів управління, що дає можливість використання всіх функцій пульта, включаючи керування осями, газом, тримерами та додатковими перемикачами. Завдяки цьому користувач отримує можливість точно і плавно налаштувати управління під свої потреби. Крім того, її реалізація на базі відкритого програмного коду дозволяє легко модифікувати і адаптувати її для інших типів контролерів або пристроїв, що розширює можливості для інтеграції у більш складні системи.

### 3.4 Калібрування та налаштування апаратно-програмного модуля

Для перевірки та калібрування розробленого апаратно-програмного модуля підключення пульта FlySky FS-I6 до симулятора польоту необхідно провести наступні налаштування у OS Windows 10/11. Для цього необхідно підключити апаратно-програмний модуль до роз'єму USB 2.0\USB 3.0, та запустити вікно налаштування «Ігрові пристрої», загальний вид якого представлено на рисунку 3.3.

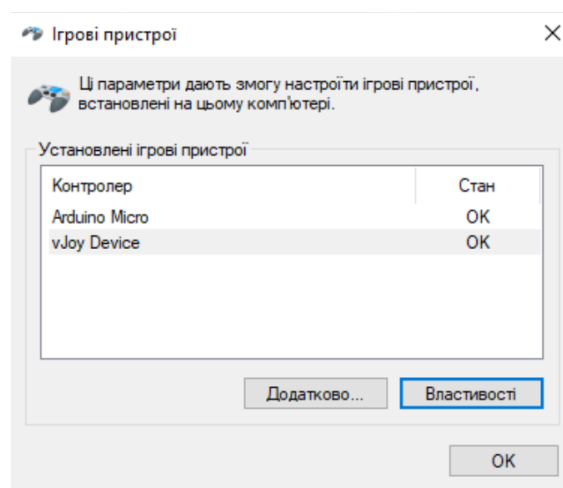


Рисунок 3.3 – Загальний вид вікна налаштування «Ігрові пристрої»

У вікні налаштування «Ігрові пристрої» обираємо пристрій «vJoy Device», та нажимаємо кнопку «Властивості», та переходимо до вікна налаштувань, як показано на рисунку 3.4.

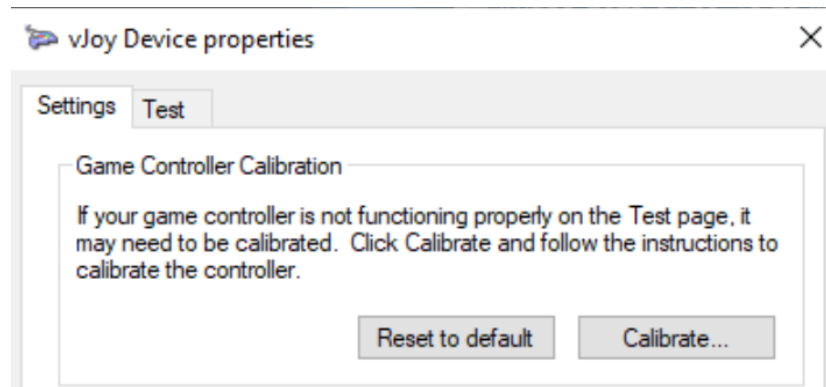


Рисунок 3.4 – Вікно vJoy Device

У вікні vJoy Device, обираємо кнопку Calibrate, та проводимо калібрування X Axis\Y Axis, як показано на рисунку 3.5.

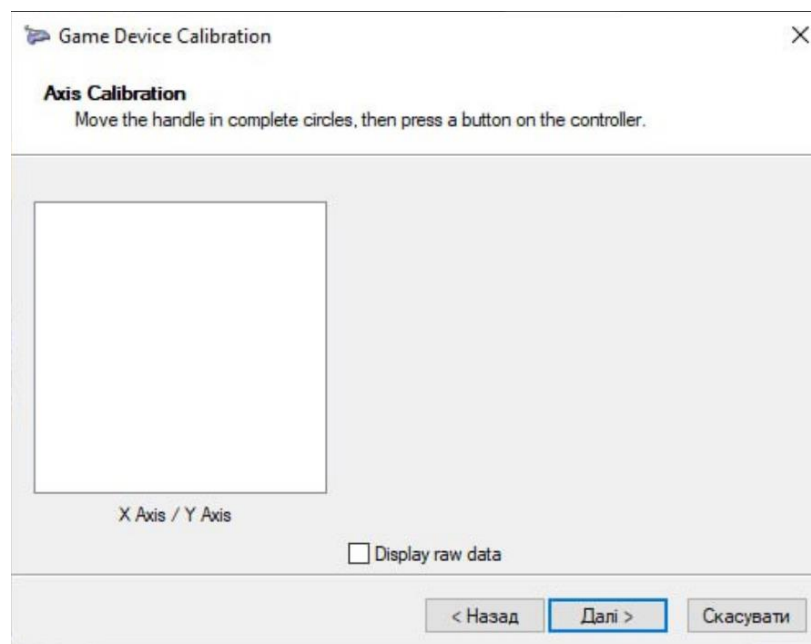


Рисунок 3.5 – Вікно калібрування X Axis\Y Axis

На останньому кроці необхідно провести тестування налаштування розробленого апаратно-програмного модуля підключення пульта FlySky FS-I6 до симулятора польоту, вікно тестування представлено на рисунку 3.6.

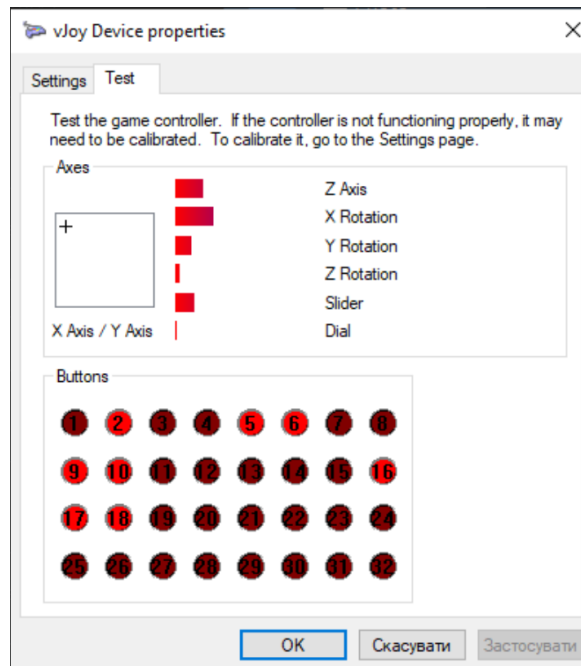


Рисунок 3.6 – Вікно тестування налаштування розробленого апаратно-програмного модуля підключення пульта FlySky FS-I6

### 3.5 Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів

Проведення експериментів з розробленим апаратно-програмним модулем обробки сигналів з пульта керування FlySky FS-I6 є необхідним для оцінки його ефективності, надійності та швидкодії. В умовах керування FPV дроном або іншими рухомими платформами кожна мілісекунда затримки може впливати на точність виконання команд, тому важливо дослідити час реакції системи та можливі джерела затримок.

Аналіз швидкості перетворення PPM-сигналів у HID-команди дозволяє перевірити ефективність алгоритму обробки сигналів та оптимізувати його в разі необхідності. Визначення стабільності роботи модуля при тривалому використанні допоможе уникнути втрати керуваності в реальних умовах експлуатації. Також важливо перевірити, чи немає збоїв у передачі даних, які можуть виникати через переривання або особливості роботи контролера Arduino Pro Micro. Експерименти дозволять виявити слабкі місця системи,

такі як недостатня швидкість обробки або неточності в калібруванні, що може спричинити некоректну роботу джойстика в симуляторі.

Результати тестування дадуть змогу не лише покращити алгоритм і програмну реалізацію, а й адаптувати систему для використання в інших застосуваннях, де важлива швидка і точна передача сигналів. Проведення таких випробувань є необхідним етапом у розробці, оскільки дозволяє створити надійну та ефективну систему керування, яка відповідатиме вимогам точності, швидкості реакції та стабільності роботи. В наслідок чого планується провести наступні експерименти, назва та мета яких вказана в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Запропоновані експерименти для оцінки роботи системи підключення FlySky FS-I6 до симулятора

№	Назва	Мета	Обґрунтування
1	Вимірювання швидкості реагування на команди керування	Визначити затримку між передачею команди з пульта FlySky FS-I6 та її виконанням у симуляторі	Час затримки є критично важливим показником для якісного управління FPV дроном, оскільки велика затримка може призвести до втрати контролю в динамічних ситуаціях
2	Оцінка швидкості перетворення PPM-сигналів у HID-команди	Оцінити час обробки сигналів у мікроконтролері Arduino Pro Micro від моменту отримання PPM до передачі команди у форматі HID-джойстика	Чим швидше відбувається конверсія сигналу, тим менше затримка між діями пілота і їх виконанням у симуляторі
3	Тестування стабільності роботи системи при тривалому використанні	Перевірити, чи змінюється час реакції або якість передачі сигналів при тривалій роботі системи	Для забезпечення надійного керування дроном важливо, щоб система працювала стабільно навіть після кількох годин використання

Апаратне забезпечення для проведення експериментів: пульт керування FlySky FS-I6, розроблений апаратно-програмний модуль синхронізації на базі Arduino Pro Micro, ПК або ноутбук з наступними характеристиками: Asus Rog 15,6" (1920 × 1080) Full HD / IPS / Intel Core i5-9300H (9 ГЕН) (up to 4,10 ГГц, 8 МБ Cache, 8 потоків) / RAM 8 ГБ / SSD 256 ГБ / Intel UHD Graphics 630 4 ГБ + nVidia GTX 1650 4 ГБ / OS Windows 11.

Отримані результати першого експерименту вимірювання швидкості реагування на команди керування, приведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Отримані результати першого експерименту вимірювання швидкості реагування на команди керування

№ вимірювання	Час подачі команди (мс)	Час виконання команди (мс)	Затримка (мс)
1	120	165	45
2	230	278	48
3	340	387	47
4	450	499	49
5	560	608	48
6	670	715	45
7	780	828	48
8	890	937	47
9	1000	1047	47
10	1110	1157	47

На базі отриманих результатів проведення першого експерименту, побудуємо графік швидкості реагування на команди керування, який представлено на рисунку 3.7.

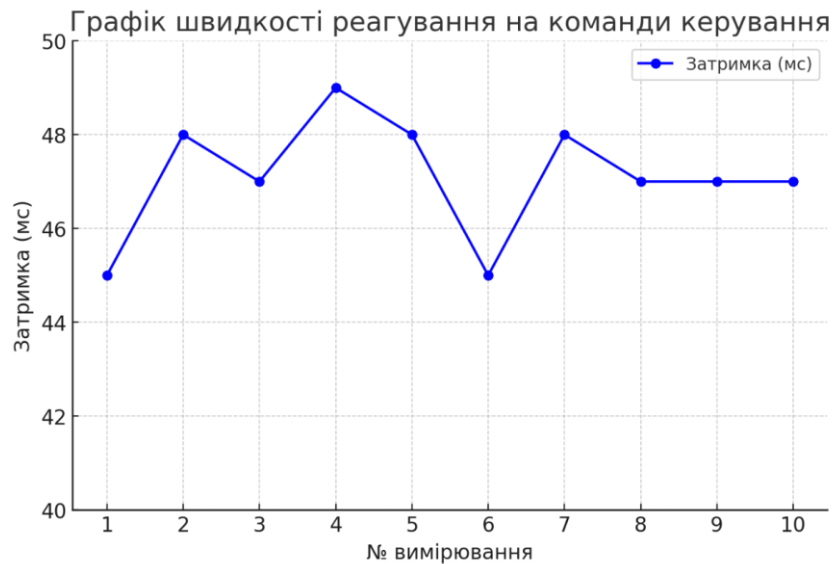


Рисунок 3.7 – Графік швидкості реагування на команди керування з пульта керування FlySky FS-I6

Графік, який представлено на рисунку 3.7 відображає швидкість реагування на команди керування, показує затримку у виконанні команд, яка не перевищує 50 мс, що підтверджує швидку обробку сигналів з пульта FlySky FS-I6.

Отримані результати другого експерименту «Оцінка швидкості перетворення PPM-сигналів у HID-команди» приведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Отримані результати другого експерименту по оцінці швидкості перетворення PPM-сигналів у HID-команди

Номер вимірювання	Вхідний PPM-сигнал (мкс)	Час обробки (мс)	Вихідна HID-команда
1	1200	3,2	X = -50
2	1400	2,8	X = 0
3	1600	3,5	X = 50
4	1800	4,0	X = 100
5	1100	3,1	X = -80
6	1500	2,9	X = 10
7	1700	3,7	X = 80
8	1300	3,3	X = -30
9	1900	4,1	X = 120
10	1250	3,0	X = -45

На базі отриманих результатів проведення другого експерименту, побудуємо графік з оцінки швидкості перетворення PPM-сигналів у HID-команди, який представлено на рисунку 3.8.

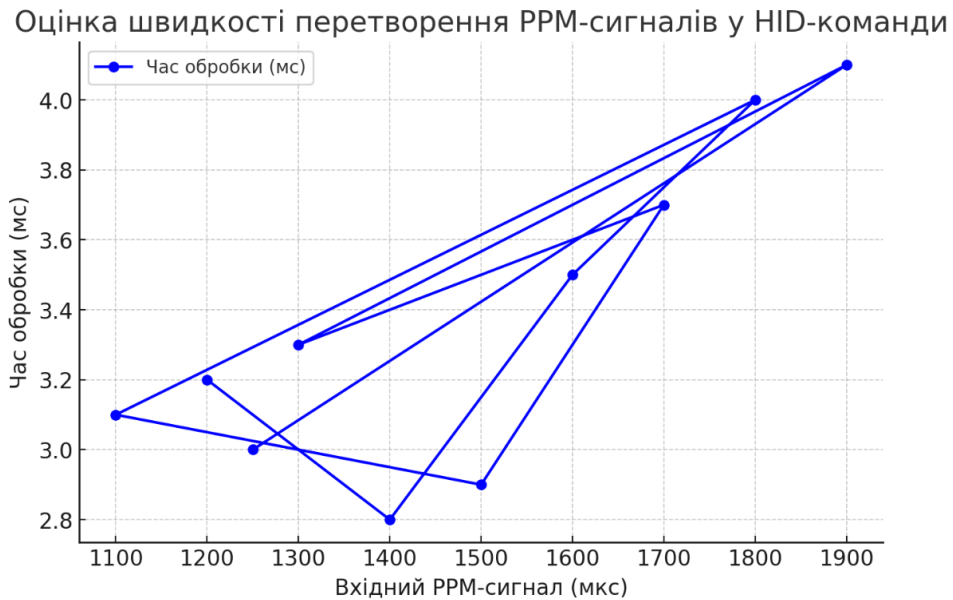


Рисунок 3.8 – Графік оцінки швидкості перетворення PPM-сигналів у HID-команди

Отримані результати третього експерименту «Тестування стабільності роботи системи при тривалому використанні» приведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Отримані результати третього експерименту з тестування стабільності роботи системи при тривалому використанні

Час роботи (хв)	Затримка сигналу (мс)	Кількість помилок передачі	Стан системи
0	3,1	0	Стабільно
10	3,2	0	Стабільно
20	3,1	0	Стабільно
30	3,2	0	Стабільно
40	3,3	0	Стабільно
50	3,2	0	Стабільно
60	3,1	0	Стабільно

На базі отриманих результатів проведення третього експерименту, побудуємо графік з тестування стабільності роботи системи при тривалому використанні, який представлено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 – Графік стабільності затримки сигналу при тривалому використанні

На основі отриманих експериментальних даних таблиць 3.2-3.4, та рисунків 3.7-3.9, можна зробити висновок, що швидкість реагування на команди керування з пульта FlySky FS-I6 є достатньо високою, оскільки максимальна затримка сигналу не перевищує 50 мс. Це свідчить про те, що оператор не відчуває значних затримок при управлінні дроном у симуляторі. В експерименті з оцінки швидкості перетворення PPM-сигналів у HID-команди результати показали, що мікроконтролер обробляє сигнали з середньою затримкою не більше 5 мс, що забезпечує точну передачу команд у реальному часі. Графічний аналіз підтвердив стабільність швидкості обробки без значних відхилень, що гарантує надійність перетворення сигналів. У третьому експерименті було протестовано стабільність роботи

системи при тривалому використанні. Дані свідчать про відсутність накопичення затримок та помилок передачі, що доводить ефективність алгоритму обробки сигналів та відсутність деградації продуктивності модуля Arduino Pro Micro. Таким чином, розроблений апаратно-програмний комплекс забезпечує швидку, точну та стабільну передачу команд, що критично важливо для навчання операторів FPV-дронів у симуляторі.

### 3.6 Охорона праці

Розробка та тестування апаратно-програмного модуля проводились у лабораторії площею 24 м<sup>2</sup> із висотою стелі 3 м. У приміщенні встановлено 4 робочі місця, кожне з яких обладнане комп'ютером, монітором, освітленням та вентиляцією. Також використовувалися паяльна станція, макетна плата, блок живлення та пульт керування FlySky FS-I6.

Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 і СНіП II-4-79, для приміщень з використанням комп'ютерної техніки рівень освітленості повинен становити не менше 300 лк. Вихідними даними до розрахунків є:

- $S = 6 \text{ м} \times 4 \text{ м} = 24 \text{ м}^2$ ;
- $E = 300 \text{ лк}$ ;
- $F = 3200 \text{ лм}$  (світлодіодна лампа потужністю  $\sim 30 \text{ Вт}$ );
- $k = 1,5$ ;
- кількість світильників, яка планується – 3.

Проведемо розрахунок потрібної кількості ламп за формулою (3.1):

$$N = (E \cdot S \cdot k) / F , \quad (3.1)$$

де  $S$  – площа приміщення;

$E$  – норма освітленості;

$F$  – світловий потік лампи;

$k$  – коефіцієнт запасу.

$$(300 \cdot 24 \cdot 1,5) / 3200 \approx 3,38.$$

Отже, для забезпечення нормативного рівня освітлення потрібно 4 світильники зі світлодіодними лампами по 3200 лм. У лабораторії встановлено саме 4 таких світильники, що забезпечує нормовану освітленість.

Всі пристрої живляться від мережі 220 В через мережеві фільтри з захистом від перенапруг. Усі лабораторні столи заземлені. Використовується обладнання з допустимою напругою до 12 В для макетування. Клас електрозахисту обладнання – II. Роботи з паяльною станцією проводилися з дотриманням техніки безпеки: використання термостійкого килимка, витяжки, захисних окулярів.

У підрозділі охорони праці було проаналізовано потенційні ризики, пов'язані з розробкою апаратно-програмного модуля синхронізації пульта керування FPV дроном у лабораторних умовах. Проведено розрахунок освітленості приміщення, який засвідчив відповідність рівня освітлення чинним нормативам, а також забезпечено належні умови мікроклімату, електробезпеки, пожежної безпеки та ергономіки [26].

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто поставлену мету – розроблено апаратно-програмний модуль, який забезпечує синхронізацію пульта керування FPV дроном FlySky FS-I6 із програмою симуляції польоту на ПК, що сприяє покращенню процесу навчання операторів FPV дронів.

У рамках проведених досліджень було виконано наступні завдання:

- проведено аналіз технічних характеристик сучасних пультів керування FPV дронами та програм для симуляції польоту;
- проаналізовано існуючі апаратні та програмні рішення підключення пульта до ПК;
- розроблено структурну схему модуля, обґрунтовано вибір апаратних компонентів, зокрема Arduino Pro Micro;
- проведено розрахунки параметрів керуючих PPM-сигналів та стійкості системи;
- реалізовано схему з'єднання апаратних модулів та алгоритм обробки керуючих сигналів з пульта;
- створено програмне забезпечення для обробки та передачі даних у форматі, сумісному з симуляторами;
- проведено калібрування, налагодження модуля та експериментальні дослідження його роботи у середовищі симуляції;
- експериментально підтверджено стабільність та ефективність функціонування модуля.

Результати роботи дозволяють знизити поріг входу для новачків у FPV-пілотування, зменшити ризики під час навчання та підвищити точність і реалістичність моделювання керування дроном. Розроблений модуль може бути основою для подальших досліджень і вдосконалення систем підготовки

операторів БПЛА. Отримані результати даної кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілей сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.4 «Сприяти прискореному розвитку високо- та середньовисокотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» [27].

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

2. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків: Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.

3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарева, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2023. 65 с.

4. Раєнко Т. В. Аналіз методів підключення пультів керування FPV-дронами до ПК для симуляції польоту / Т. В. Раєнко // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2025) : збірник студентських наукових статей. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Вип. 1. – С. 211-216.

5. FlySky FS-I6X 10Ch – радіоапаратура з приймачем FS-IA6B та телеметрією. URL: <https://dron-shop.com.ua/fpv/flysky-fs-i6x-10ch> (час доступу 19.04.2025).

6. Отрощенко П. С. Нашлемна система керування FPV дроном: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра: спец. 171 – електроніка /

наук. кер. В. В. Гриненко. Суми: Сумський державний університет, 2023. 101 с.

7. Апаратура управління FrSky Taranis X9DP 2019 ACCESS+2S 2100mAh // MotoRC, 2025. URL: [https://motorc.com.ua/ua/elektronikadlyaletatelnyhapparatov/radioupravlenie/apparatury-upravleniyainazemnyestancii/apparaturyupravleniya/apparaturaupravleniya-frskytaranisx9dp2019access2s2100mah?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=PR\\_Shopping\\_200\\_more&utm\\_content=shua10969&gad\\_source=1&gbraid=0AAAAAqPZfbquze9P5G9jrzb8MmGvcfh1Z&gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3kPB1BBf0RXuZolcUW8zdtjb52KfIRuzmHzK0WvwTep1ZF\\_B3NmcRoCUHoQAvD\\_BwE](https://motorc.com.ua/ua/elektronikadlyaletatelnyhapparatov/radioupravlenie/apparatury-upravleniyainazemnyestancii/apparaturyupravleniya/apparaturaupravleniya-frskytaranisx9dp2019access2s2100mah?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=PR_Shopping_200_more&utm_content=shua10969&gad_source=1&gbraid=0AAAAAqPZfbquze9P5G9jrzb8MmGvcfh1Z&gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3kPB1BBf0RXuZolcUW8zdtjb52KfIRuzmHzK0WvwTep1ZF_B3NmcRoCUHoQAvD_BwE) (дата звернення 10.04.2025).

8. FPV Пульт RadioMaster TX16S MKII ELRS M2 // DefPoint, 2025. URL: [https://defpoint.ua/drony-ta-zapchastyny/zapchastyny-dlya-droniv/fpv-pult-radiomastertx16smkiielrsm2/?gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3kPnJRVnew\\_m3YbIrm1YHIWMWJwKs03Fs7GZf8NtOBAYlxzznhScThoCQoMQAvD\\_BwE&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=np\\_pmax\\_general&utm\\_term=&utm\\_content=](https://defpoint.ua/drony-ta-zapchastyny/zapchastyny-dlya-droniv/fpv-pult-radiomastertx16smkiielrsm2/?gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3kPnJRVnew_m3YbIrm1YHIWMWJwKs03Fs7GZf8NtOBAYlxzznhScThoCQoMQAvD_BwE&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=np_pmax_general&utm_term=&utm_content=) (дата звернення 10.04.2025).

9. FlySky FS-I6X 10Ch - радіоапаратура з приймачем FS-IA6B та телеметрією // Prom.ua, 2025. URL: [https://levashop.com.ua/ua/p2328217576-flyskyi6x10ch.html?source=merchant\\_center&gad\\_source=1&gbraid=0AAAAAqjSDvKfATcl1ZRbw7hYxtOsl7Sc&gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3nVFwTrNjkGFRH62wecOdANV7IsLFErVTQC9roJUdMpf5xyE7mzRNBoC0FMQAvD\\_BwE](https://levashop.com.ua/ua/p2328217576-flyskyi6x10ch.html?source=merchant_center&gad_source=1&gbraid=0AAAAAqjSDvKfATcl1ZRbw7hYxtOsl7Sc&gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3nVFwTrNjkGFRH62wecOdANV7IsLFErVTQC9roJUdMpf5xyE7mzRNBoC0FMQAvD_BwE) (дата звернення 10.04.2025).

10. Jumper T16 Pro Hall V2 // DRONEFACTORY, 2025. URL: <https://www.dronefactory.ch/produkt/jumper-t16-pro-hall/> (дата звернення 10.04.2025).

11. Лоточук О. М. Дослідження і розробка віртуального симулятора для навчання управлінням FPV дроном: пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському)

рівні, спеціальність 122 Комп'ютерні науки / О. М. Лоточук; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2024. – 52 с.

12. Шумаков М. В. Програмний застосунок симулювання польоту дрону з використанням Unreal Engine: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр»: спец. 121 «Інженерія програмного забезпечення» / М. В. Шумаков; ЧНУ ім. Петра Могили. – Миколаїв, 2023. – 58 с.

13. Сень, Б. В. Автоматизована система керування моделі авіаційного дрона від першої особи: магістерська дис.: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Сень Богдан Вячеславович. – Київ, 2024. – 109 с.

14. Лук'янець, Я. І. Трейнер з управління дроном на Unity: дипломний проєкт ... бакалавра: 123 Комп'ютерна інженерія / Лук'янець Ярослав Іванович. – Київ, 2024. – 95 с.

15. Астапєєв Д. С. Архітектурне проектування FPV-квадрокоптера з інтегрованими системами автонаведення та скидання боєприпасу на базі AI: пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 126 Інформаційні системи та технології / Д. С. Астапєєв; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2024. – 88 с.

16. Спаський, Я. В. Система управління та навігації БПЛА: магістерська дис.: 172 Телекомунікації та радіотехніка / Спаський Ярослав Вячеславович. - Київ, 2024. - 86 с.

17. Міндзіброцький Р. С. Комп'ютеризована система керування FPV дроном для симулятора польоту: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра: спец. 123 - комп'ютерна інженерія / наук. кер. Ю. З. Лецишин. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. 85 с.

18. Макушев І. А. Розробка математичної моделі для комп'ютеризованого керування параметрами FPV дрона: пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / І. А. Макушев; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки, – Харків, 2025. – 73 с.

19. Штогрин, П. П. Спосіб організації засобів управління літальним апаратом: магістерська дис.: 123 Комп'ютерна інженерія / Штогрин Павло Петрович. – Київ, 2023. – 142 с.

20. Сілідусєв Р. А. Метод підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів: дипломна робота магістра: 172 Електронні комунікації та радіотехніка / Р. А. Сілідусєв; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2024. – 137 с.

21. Arduino Pro Micro // МікроАмпер, 2025. URL: [https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=60&product\\_id=204&gad\\_source=1&gbraid=0AAAAADk5dvqjvj47Fbs21XCZNbl47GYri&gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3pyAdvAzCWzDp1pKOen7yIKHYKvEoRVV39y5aHUDOUOMjR-0DTBqJhoCiBEQAvD\\_BwE](https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=60&product_id=204&gad_source=1&gbraid=0AAAAADk5dvqjvj47Fbs21XCZNbl47GYri&gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3pyAdvAzCWzDp1pKOen7yIKHYKvEoRVV39y5aHUDOUOMjR-0DTBqJhoCiBEQAvD_BwE) (дата звернення 14.04.2025).

22. Макетная плата Teensy++ 2.0 // Arduino-Kit, 2025. URL: <https://arduino-kit.com.ua/maketnaya-plata-teensy-2-0.html> (дата звернення 14.04.2025).

23. Плата розробки STM8S103F3P6 // МікроАмпер, 2025. URL: [https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=149&product\\_id=1429&gad\\_source=1&gbraid=0AAAAADk5dvqjvj47Fbs21XCZNbl47GYri&gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3heGSqLLApXO2erc8oegL4ZJr3GiwPM1B3C0NZAHOh\\_faEe6gKW4RoCfQsQAvD\\_BwE](https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=149&product_id=1429&gad_source=1&gbraid=0AAAAADk5dvqjvj47Fbs21XCZNbl47GYri&gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3heGSqLLApXO2erc8oegL4ZJr3GiwPM1B3C0NZAHOh_faEe6gKW4RoCfQsQAvD_BwE) (дата звернення 14.04.2025).

24. Raspberry Pi Pico // МікроАмпер, 2025. URL: [https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=449&product\\_id=6415&gad\\_source=1&gbraid=0AAAAADk5dvqjvj47Fbs21XCZNbl47GYri&gclid=C](https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=449&product_id=6415&gad_source=1&gbraid=0AAAAADk5dvqjvj47Fbs21XCZNbl47GYri&gclid=C)

jwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3oOt14\_QirFwVZ5VgECvuKTPllvt7wl5APxprzh6  
SPWz0B9c1X6whoCqAIQAvD\_BwE (дата звернення 14.04.2025).

25. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навч. посіб. для студентів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. - Харків: Панов А.М., 2020. – 240 с.

26. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / упоряд.: В. А. Айвазов. Т. Є. Стиценко., Н. Л. Березуцька ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 28 с. – 1,81.

27. Ціль 9. Промисловість, інновації та інфраструктура // ДІЯБізнес, 2025. URL: [https://business.diiia.gov.ua/entrepreneur-handbook/item/cil\\_9\\_promislovist\\_innovaciyi\\_ta\\_infrastruktura](https://business.diiia.gov.ua/entrepreneur-handbook/item/cil_9_promislovist_innovaciyi_ta_infrastruktura) (дата звернення: 06.06.2025).