

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

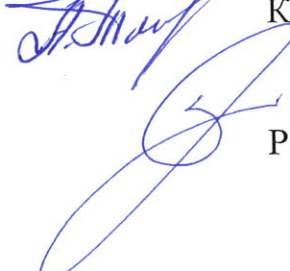
до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Проектування та розробка комплексної системи дистанційного збору
та передачі інформації»

Виконав студент 2 курсу, групи АТ-29м
спеціальності 174 “ Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка”

 Нєвєдров Микита Олександрович

(прізвище та ініціали студента)

 Керівник: к.т.н., доц. Ткачук А.Г.

(науковий ступінь, вчене звання, посада,
прізвище та ініціали)

Рецензент: к.т.н., доц., Громовий О.А.

(науковий ступінь, вчене звання, посада,
прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”
Факультет комп’ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Спеціальність 174 “Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри робототехніки,
електроенергетики та автоматизації
ім. проф. Б.Б. Самотокіна
к.т.н., доц. Громовий О.А.
« 17 » грудня 2025р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

Студент Неведров Микита Олександрович

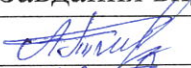
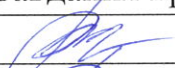
1. Тема роботи: Автоматизована система управління технологічним процесом подачі та змішування компонентів морозива

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру «2» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: матеріали звіту про переддипломну практику, вимоги до дистанційного моніторингу наземних об’єктів із використанням БПЛА, канали керування, телеметрії та відеопередачі, протоколи обміну даними, методи оптичної навігації, мікроконтролер і дисплей, інтерфейс QSPI, контроль цілісності даних за допомогою CRC-8, вимоги до надійності та відмовостійкості системи

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці):
технічне завдання, огляд та аналіз існуючих систем моніторингу наземних об’єктів, дослідження каналів зв’язку й протоколів передачі даних між оператором і БПЛА, аналіз методів оптичної навігації, розробка структурної та функціональної схем системи, вибір електронних комплектуючих, організація обміну даними через інтерфейс QSPI, реалізація контролю цілісності даних за допомогою CRC-8, розробка програми мікроконтролера, складання та налаштування модулів системи, перевірка її працездатності.

5. Перелік презентативного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових слайдів/креслень): структурна схема системи дистанційного збору та передачі інформації, функціональна схема, схема каналів зв'язку між оператором і БПЛА, схема підключення електронних модулів, схема обміну даними через інтерфейс QSPI, блок-схема алгоритму роботи системи та перевірки CRC-8, загальний вигляд зібраної системи, результати перевірки її працездатності
6. Консультанти з кваліфікаційної роботи магістра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

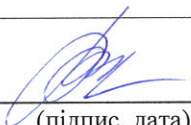
Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1, 2, 3,4	Ткачук А.Г.		
5,6,7	Ткачук А.Г.		

7. Дата видачі завдання 22.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підготувати звіт про переддипломну практику	1 тиждень	виконано
2.	Збір та аналіз джерел за темою роботи, огляд існуючих систем	1 тиждень	виконано
3.	Вибір і обґрунтування технічних та програмних засобів	2 тиждень	виконано
4.	Розробка структурної, функціональної та блок-схеми	3 тиждень	виконано
5.	Аналіз отриманих результатів	4 тиждень	виконано
6.	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	4 тиждень	виконано

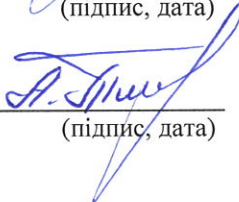
Студент


(підпис, дата)

М.О. Нєвєдров

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис, дата)

А.Г. Ткачук

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	5
ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	10
1.АНАЛІЗ РІШЕНЬ ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ЇХ АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ	11
1.1. Використання роботизованих комплексів у різних сферах людської діяльності	11
1.2. БПЛА.....	13
1.3. Готова продукція від виробників.....	1514
1.4. Класифікація та можливості БПЛА.....	16
1.5. Порівняння літакових БПЛА та квадрокоптерів	2322
2. СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ТА ОБМІН ІНФОРМАЦІЄЮ МІЖ ОПЕРАТОРОМ І ДРОНОМ	24
2.1. Загальна архітектура каналів зв'язку.....	24
2.2. Канали керування та телеметрії	Ошибка! Закладка не определена.25
2.3. Системи відеотрансляції	27
2.4. Технології та типи каналів зв'язку	Ошибка! Закладка не определена.28
2.5. Стільникові мережі (4G/5G).....	Ошибка! Закладка не определена.28
2.6. Протоколи обміну даними.....	Ошибка! Закладка не определена.29
2.7. Надійність і відмовостійкість каналів зв'язку	Ошибка! Закладка не определена.30
3. МЕТОДИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИЧНОЇ НАВІГАЦІЇ В БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ.....	4232
3.1. Методи оптичної навігації.....	4232
3.3. Візуальна навігація на основі SLAM	Ошибка! Закладка не определена.33
3.4.Оптичний потік.....	34
3.5. Навігація за візуальними орієнтирами.....	35
3.6.Оптична навігація на основі глибинних сенсорів та лідача.....	36
4. ВИБІР ЕЛЕКТРОННИХ КОМПЛЕКТУЮЧИХ	Ошибка! Закладка не

					МКАТ.480.004.019.-ПЗ.			
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата				
Разраб		Неведров			Пояснювальна записка . “Проектування та розробка комплексної системи дистанційного збору та передачі інформації”	Литера	Лист	Листов
Пров						у	1	74
Н. Контр.						ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “Житомирська політехніка” АТ-29м		
Утв								

определена.....	40
4.1. Вибір контролера.....	41
4.2. Вибір дисплея.....	47
5. QSPI ІНТЕРФЕЙС	Ошибка! Закладка не определена.
определена.....	51
6. ЦИКЛІЧНИЙ НАДЛИШКОВИЙ КОНТРОЛЬ	Ошибка! Закладка не определена.
.....	5
6.1. Принцип роботи.....	56
6.2. Основні параметри CRC-8.....	57
7. РЕАЛІЗАЦІЯ ЗБІРКИ МОДУЛІВ СИСТЕМИ ТА ЇЇ НАЛАШТУВАННЯ.....	60
ВИСНОВКИ	663
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ	Ошибка! Закладка не определена.
Додаток А Текст управляючої програми мікроконтролера	65

					МКАТ.480.004.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

FPV – Ferst Person View

OSD – On Screen Display

ESC – Electrons Speed Controller

RC – Radio Control

БПЛА – Безпілотний Літальний Апарат

TTL - Time to live

MTDF – Module Transfer Data Flight

					<i>МКАТ.480.015.019.-ПЗ.</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Рівень інтеграції роботизованих комплексів у всі сфери діяльності людства сьогодні досяг свого історичного максимуму. Інтеграція роботів у виробничі процеси дала змогу обмежити участь людини на усіх стадіях виробництва, а також дозволила людині не піддаватися небезпечним умовам праці та контакту з шкідливими речовинами. Більшість роботизованих систем повністю або частково автоматизовані, але існують процеси, які потрібно виконувати під повним контролем оператора, тому в таких ситуаціях застосовують керованих роботів. При ліквідації наслідків техногенних катастроф або природних катаклізмів людство уже не може обійтися без керованих роботизованих комплексів для дослідження та оцінки рівня загрози для людини.

Часто виникає потреба використання роботів в умовах, що перешкоджають задовільній якості прийому та передачі сигналів з використанням дротового зв'язку. В такому випадку постає питання навігації робота з використанням телеметрії. Для цього використовують технології бездротової передачі сигналів. Дана технологія дозволяє встановлювати зв'язок з контрольованим пристроєм за допомогою протоколів бездротової передачі сигналів. За рахунок зростання складності розв'язуваних науково-технічних завдань, автоматична обробка і аналіз візуальної інформації стають все більш актуальними питаннями. Дані технології використовуються в дуже значимих областях науки і техніки, таких як автоматизація процесів, підвищення продуктивності, підвищення якості виробів, що випускаються, контроль виробничого обладнання, інтелектуальні роботизовані комплекси, системи управління рухомими апаратами, біомедичні дослідження та безліч інших. Крім того, можна сказати, що успіх сучасного бізнесу ґрунтується головним чином на якості пропонованої продукції. А для його забезпечення, якщо говорити про виробництво матеріальних речей, потрібний візуальний контроль.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ РІШЕНЬ ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ЇХ АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

1.1 Використання роботизованих комплексів у різних сферах людської діяльності

Використання роботизованих комплексів активно поширюється у різних сферах людської діяльності, сприяючи підвищенню ефективності, точності та безпеки виконуваних завдань. Ось деякі з ключових сфер, де роботи знаходять своє застосування:

- **Промисловість**

1. Виробництво та збирання: Роботизовані руки виконують зварювання, фарбування, збірку деталей, сортування та пакування продукції. Це дозволяє зменшити час виробництва та підвищити якість продукції.

2. Контроль якості: Роботи використовуються для візуального огляду і тестування продукції, що забезпечує більш високу точність виявлення дефектів.

- **Медицина**

1. Хірургія: Роботизовані хірургічні системи, такі як Da Vinci, дозволяють виконувати складні операції з мінімальними інвазіями, зменшуючи ризик ускладнень та скорочуючи час відновлення пацієнтів.

2. Реабілітація та догляд: Роботи-асистенти допомагають у реабілітації пацієнтів, виконують фізіотерапевтичні процедури і навіть допомагають з особистою гігієною та харчуванням.

- **Сільське господарство**

1. Посів та збирання врожаю: Роботизовані комплекси можуть автоматизувати процеси посіву, догляду за рослинами та збирання врожаю, знижуючи потребу в ручній праці і підвищуючи ефективність використання

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ресурсів.

2. Моніторинг стану полів: Роботи оснащені сенсорами для оцінки стану ґрунту, рослин та виявлення шкідників, що дозволяє вчасно вживати заходів для захисту врожаю.

- Логістика та транспорт

1. Автономні транспортні засоби: Безпілотні автомобілі та дрони використовуються для доставки товарів, що зменшує час доставки і витрати на транспорт.

2. Автоматизовані склади: Роботи на складах виконують завдання з переміщення, сортування та пакування товарів, що підвищує ефективність логістичних процесів.

- Охорона та безпека

1. Патрулювання та моніторинг: Роботи можуть виконувати функції охорони, здійснювати патрулювання територій, виявляти підозрілі активності та повідомляти про них відповідні служби.

2. Розмінування та знешкодження вибухових пристроїв: Роботи використовуються для безпечного розмінування територій та знешкодження вибухівки, зменшуючи ризик для людей.

- Дослідження та рятувальні операції

1. Космічні дослідження: Роботизовані апарати використовуються для дослідження планет, збору зразків та проведення наукових експериментів в екстремальних умовах космосу.

2. Пошуково-рятувальні роботи: Роботи застосовуються для пошуку і порятунку людей у важкодоступних або небезпечних місцях, таких як зони стихійних лих або завали будівель.

- Освіта та розваги

1. Навчання: Роботи можуть бути використані як інтерактивні інструменти для навчання дітей програмуванню, математиці та інших наук.

2. Розважальні роботи: Роботи, такі як аніматронні фігури в парках розваг

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

або домашні роботи-іграшки, забезпечують розваги та взаємодію з людьми.

Впровадження роботизованих комплексів продовжує змінювати різні аспекти людської діяльності, роблячи їх більш ефективними та безпечними. З розвитком технологій очікується ще ширше використання роботів у нових сферах.

1.2 Застосування БПЛА.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, знайшли широке застосування у багатьох сферах людської діяльності завдяки своїй мобільності, маневреності та можливості виконувати завдання у важкодоступних або небезпечних для людей місцях. Ось деякі з основних сфер використання БПЛА:

- Військова справа

1. Розвідка та спостереження: Дрони використовуються для збору розвідувальної інформації, моніторингу руху ворога та спостереження за полем бою в режимі реального часу.

2. Ударні операції: Озброєні дрони можуть виконувати точкові удари по визначених цілях, зменшуючи ризик для пілотів та підвищуючи точність ураження.

- Сільське господарство

1. Моніторинг полів: Дрони оснащені сенсорами та камерами, що дозволяють моніторити стан рослин, виявляти хвороби, шкідників та оцінювати потреби у воді або добривах.

2. Агрохімічні обробки: БПЛА використовуються для розпилення пестицидів та добрив, забезпечуючи рівномірний розподіл і зменшуючи вплив на навколишнє середовище.

- Логістика та доставка

1. Доставка товарів: Дрони можуть доставляти невеликі вантажі, ліки або продукти, особливо в важкодоступні місця або райони з обмеженою

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інфраструктурою.

2. Автоматизовані склади: БПЛА використовуються для інвентаризації товарів на складах, швидко і точно перевіряючи запаси.

- Екологія та охорона природи

1. Моніторинг дикої природи: Дрони допомагають відслідковувати переміщення тварин, вивчати їх поведінку та виявляти браконьєрів.

2. Оцінка стану навколишнього середовища: БПЛА використовуються для збору даних про стан лісів, водойм та інших природних об'єктів, допомагаючи виявляти забруднення та оцінювати шкоду від стихійних лих.

- Будівництво та інфраструктура

1. Аерофотозйомка та картографія: Дрони забезпечують створення високоточних карт і 3D-моделей місцевості, що допомагає в плануванні та моніторингу будівельних проектів.

2. Інспекція інфраструктури: БПЛА використовуються для перевірки стану мостів, вітряних турбін, ліній електропередач та інших об'єктів, виявляючи дефекти та пошкодження.

- Надзвичайні ситуації та рятувальні операції

1. Пошук і порятунок: Дрони можуть швидко обстежувати великі території під час пошуково-рятувальних операцій, виявляючи людей, які потребують допомоги.

2. Оцінка збитків: Після стихійних лих, таких як землетруси чи повені, дрони допомагають оцінювати масштаб руйнувань та планувати рятувальні заходи.

- Медіа та розваги

1. Аерозйомка: Дрони широко використовуються у кінематографії, журналістиці та фотографії для створення ефектних аерознімків і відео.

2. Змагання та шоу: Існують змагання дронів та шоу з синхронізованими польотами дронів, що стають все популярнішими.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Охорона та безпека

1. Патрулювання: Дрони можуть патрулювати території, виявляючи незаконну діяльність або підозрілу активність.

2. Контроль масових заходів: Під час масових заходів дрони використовуються для забезпечення безпеки, моніторингу натовпу та координації дій служб.

Завдяки своїй універсальності та можливості швидко адаптуватися до різних завдань, БПЛА стають незамінними інструментами у багатьох галузях, сприяючи підвищенню ефективності, безпеки та точності виконуваних робіт.

Існує багато різних технічних задач які можливо вирішити із застосуванням дронів із дистанційним керуванням.

1.3 Готова продукція від виробників

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, класифікуються за різними характеристиками, такими як призначення, розмір, дальність польоту та спосіб керування. Ось деякі з основних видів БПЛА:

За призначенням:

1. Військові:

- Розвідувальні: використовуються для збору інформації, спостереження та розвідки (наприклад, MQ-1 Predator).
- Ударні: призначені для завдання ударів по наземних цілях (наприклад, MQ-9 Reaper).
- Мультифункціональні: можуть виконувати різні завдання, такі як розвідка та удари (наприклад, Bayraktar TB2).

2. Цивільні:

- Спостережні: використовуються для аерофотозйомки, моніторингу навколишнього середовища та сільськогосподарських завдань.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Комерційні: застосовуються в логістиці для доставки вантажів (наприклад, дрони від Amazon Prime Air).
- Рятувальні: використовуються для пошуково-рятувальних операцій.

За розміром:

1. Нанодрони: дуже малі дрони, що важать кілька грамів і використовуються для дуже специфічних завдань.
2. Міні-дрони: важать від кількох десятків до кількох сотень грамів, зазвичай використовуються для аерофотозйомки та розваг (наприклад, DJI Mavic Mini).
3. Малі дрони: важать до кількох кілограмів, використовуються для різних завдань, включаючи комерційні та військові цілі.
4. Середні та великі дрони: великі апарати, які можуть нести значні корисні навантаження, часто використовуються у військових цілях (наприклад, MQ-9 Reaper).

За дальністю польоту:

1. Короткого радіусу дії: дальність до 50 км, використовуються для місцевих завдань.
2. Середнього радіусу дії: дальність до 200 км, можуть використовуватися для регіональних завдань.
3. Далекого радіусу дії: дальність понад 200 км, застосовуються для стратегічних завдань і тривалих місій.

За способом керування:

1. Радіокеровані: керуються оператором за допомогою радіоканалу.
2. Автономні: виконують місії самостійно, використовуючи попередньо задані програми та навігаційні системи.
3. Напіваавтономні: поєднують автономні та радіокеровані режими, можуть виконувати частину завдань самостійно, а частину під керуванням оператора.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Ці категорії дозволяють класифікувати безпілотники залежно від їх характеристик і сфер застосування.

1.4 Класифікація та можливості БПЛА

Що таке БПЛА і де їх використовують

БПЛА (БЛА) – аббревіатура від “безпілотні літальні апарати”. Широкого цивільного поширення ці пристрої набули відносно недавно. Вони використовуються в багатьох галузях, включно з військовою, цивільною та науковою.

У військовій галузі БПЛА використовують для розвідки, спостереження, виявлення цілей і виконання бойових завдань без участі пілота. У цивільній сфері БПЛА використовують для різних завдань, як-от контроль над кордонами, пошук зниклих людей, аерофотозйомка і навіть доставлення товарів. у науковій галузі безпілотники використовують для збирання даних та досліджень у галузі геології, екології, метеорології та багатьох інших галузях.

Історія створення безпілотної техніки

Історія першого безпілотника міцно пов’язана з ім’ям Ніколаса Кіфера, одного з найвидатніших авіаційних піонерів авіації. У 1917 році Кіфер розробив і запустив перший в історії безпілотний літальний апарат, який отримав назву Kettering Bug.

Цей революційний апарат вважається першим у своєму роді, заклавши основу для майбутнього розвитку безпілотних систем. Зовні біплан нагадував

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

невеликий літак завдовжки близько 5 метрів. Він був оснащений чотирма металевими гвинтами і пропелером, що працює від двигуна внутрішнього згоряння. Апарат здатний був нести невеликі боєприпаси і управлявся (нехай і зовсім примітивно) по радіоканалу.



Рис. 1.1 — “Kifer Ket”

При цьому повністю безпілотний політ така машина здійснювати не могла – вона була, скоріше, повітряною торпедою, що скидала боєприпаси і падала на противника зверху, ніж повноцінним ударним безпілотником. “Кіфер Кіт” або “Жук Кіфера” мав неперевершені переваги для свого часу. Завдяки впровадженню механічної системи управління з гіростабілізатором апарат міг автономно долати задану відстань, доки не вичерпувалися його запаси палива. Безпілотник здатний був досягти швидкості близько 120 кілометрів на годину. “Жук Кіфера” пройшов весь шлях сучасного безпілотника – його розробку замовляла армія США, а повноцінне функціонування першої у своєму роді програми припинилося через завершення фінансування.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Принцип роботи

Принцип роботи безпілотної системи ґрунтується на комбінації сенсорних систем, автопілота і програмного забезпечення. Сенсори, такі, як камери, радары, лідари і система навігації, збирають інформацію про навколишнє середовище і положення апарата. Ці дані передаються в автопілот, який обробляє інформацію і ухвалює рішення про подальший рух і поведінку безпілотної системи, керуючи обертанням двигунів і відхиленням апарата від заданої траєкторії.

Принцип і методи управління безпілотною системою можуть відрізнятися залежно від його конкретного призначення. Деякі безпілотної системи можуть бути повністю автономними і здатні виконувати завдання самостійно без участі людини. Інші дрони можуть бути дистанційно керованими, де оператор на землі керує апаратом за допомогою пульта управління або комп'ютерного інтерфейсу. Більшість сучасних апаратів, як цивільних, так і військових, можуть керуватися і оператором, і літати самостійно.

Застосування дронів у повсякденному житті

Останні кілька років БПЛА все більше впроваджуються в цивільну авіацію. Їх застосовують для аерофотозйомки та відеозйомки, що дає змогу отримувати якісні зображення з повітря для різних цілей, включно з рекламою, нерухомістю та туризмом. Також безпілотної системи використовуються для доставки товарів, що скорочує час і витрати на логістику. Найближчий приклад – дрони компанії Amazon.

Також дрони активно застосовуються в сільському господарстві. Вони можуть здійснювати моніторинг і оцінку стану полів, врожайності та рівня (і якості) зрошення. Завдяки цьому фермери можуть ухвалювати більш виважені рішення про удобрення ґрунту, обприскування та управління рослинництвом,

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

що підвищує ефективність виробництва і зменшує негативний вплив на довкілля. Найближчий приклад – дрони DJI Agras.



Рис. 1. 2 — Дрон DJI Agras

Безпілотні літальні апарати відіграють важливу роль у наукових дослідженнях. Їх використовують для вивчення довкілля, моніторингу екосистем, дослідження змін клімату, виявлення та вивчення диких тварин і багато чого іншого. Завдяки своїй маневреності та здатності літати в недоступних для людини місцях, вони надають нові можливості для наукових відкриттів та аналізу даних.

Види БПЛА

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дрони можуть бути не тільки літаючими, але також надводними, підводними і наземними. Вони можуть використовуватися для моніторингу кордонів, патрулювання і забезпечення безпеки та інших операцій. Американські RQ-4 Global Hawk використовують для розвідки, MQ-9 Reaper або БЛА “Іноходець” – для розвідки та ударів по наземних цілях, підводні дрони Orca використовують для розвідки.

Наземні дрони на кшталт бойової платформи “Маркер” або Milrem Themis можуть використовуватися військами на полі бою для постачання або перевезення важких вантажів. Для навігації в таких системах використовують лідари або камери, також вони можуть управлятися з пульта оператора.



Рис. 1. 3 — Безпілотне метро Дубая

Є й суто цивільні системи. Найвідоміший приклад – безпілотне метро Дубая. Управління безпілотним метро в Дубаї здійснюється автоматично, без участі людини в процесі управління поїздами. Воно повністю засноване на системі

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

штучного інтелекту, комп'ютерних алгоритмах, передових сенсорних технологіях. Це дає змогу досягти високої точності, ефективності та безпеки в роботі системи.

Система має низку заходів безпеки, включно з передовими системами виявлення перешкод, безперервним моніторингом залізничної колії та постійним зв'язком із центральним контрольним центром. Це дає змогу системі автоматично реагувати на будь-які можливі загрози та вживати відповідних заходів для забезпечення безпеки пасажирів.

Застосування БПЛА

У промисловості сучасні безпілотники використовуються для виконання складних завдань, таких, як інспекція будівельних об'єктів, обслуговування електростанцій, дослідження родовищ і багато іншого. Вони дають змогу скоротити витрати на обслуговування і збільшити безпеку працівників.

БПЛА також можуть використовуватися в транспорті для доставки вантажів і пошти. Це дає змогу скоротити час доставки та зменшити витрати на персонал і паливо, особливо в умовах Арктики та спекотного клімату Африки. У сільському господарстві безпілотники використовуються для аналізу врожайності, виявлення хвороб рослин і визначення оптимального часу для збору врожаю. БПЛА дають змогу скоротити витрати на обслуговування і збільшити врожайність.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1. 4 — сільськогосподарські дрони

Також сучасні сільськогосподарські дрони використовуються для розпилення пестицидів. У медицині безпілотники використовуються для доставки медикаментів та інструментів на місце лиха, а також для транспортування органів для трансплантації. Це дає змогу скоротити час доставки і збільшити шанси на порятунок життя.

Найбільш просунутим використання безпілотників наразі є у збройних силах. Дрони використовують не тільки для розвідки і спостереження, а й для ударів і знищення техніки противника, а також для дозавправлення винищувачів у польоті, глибоководних досліджень та інших складних військових місій, пов'язаних із високим ризиком для життя.

1.5 Порівняння літакових БПЛА та квадрокоптерів

Вибір між літаком і квадрокоптером залежить від конкретних потреб та умов використання. Ось порівняння ключових характеристик літаків і

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

квадрокоптерів, що допоможе визначити, який тип БПЛА підходить для ваших цілей:

- Літакові БПЛА

Переваги:

1. Дальність польоту: Літакові БПЛА зазвичай мають більшу дальність польоту, що дозволяє їм покривати великі території.
2. Тривалість польоту: Завдяки аеродинамічній конструкції вони можуть залишатися в повітрі довше, використовуючи менше енергії.
3. Швидкість: Літакові дрони зазвичай мають вищу крейсерську швидкість, що дозволяє швидше досягати цілі.
4. Стабільність у польоті: Вони більш стабільні в умовах сильного вітру та поганих погодних умов.

Недоліки:

1. Зліт і посадка: Потребують злітно-посадкової смуги або катапульт для зльоту та парашутної системи для посадки.
2. Маневреність: Менш маневрені порівняно з квадрокоптерами, особливо в обмежених просторах.
3. Вартість: Часто вимагають більш складної і дорогої технічної підтримки.

- Квадрокоптери

Переваги:

1. Вертикальний зліт і посадка: Не потребують злітно-посадкової смуги, можуть злітати та сідати вертикально, що робить їх ідеальними для використання в міських умовах і важкодоступних місцях.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Маневреність: Дуже маневрені, можуть зависати на місці та виконувати точні рухи.
3. Простота використання: Часто простіші у використанні та технічному обслуговуванні.
4. Ціна: Багато моделей квадрокоптерів є більш доступними за ціною.

Недоліки:

1. Дальність і тривалість польоту: Зазвичай мають меншу дальність і тривалість польоту через обмежену ємність батареї.
2. Стійкість до вітру: Менш стійкі до сильного вітру та інших несприятливих погодних умов.
3. Швидкість: Як правило, мають нижчу крейсерську швидкість.

Висновок

Вибір між літаком і квадрокоптером залежить від вашого завдання:

- Для довготривалих і далеких місій (наприклад, розвідка, патрулювання великих територій) літакові БПЛА є кращим вибором.
- Для роботи в обмежених просторах або міських умовах, де потрібні маневреність і вертикальний зліт/посадка (наприклад, аерофотозйомка, інспекції будівель), квадрокоптери є більш підходящими.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ТА ОБМІН ІНФОРМАЦІЄЮ МІЖ ОПЕРАТОРОМ І ДРОНОМ

2.1. Загальна архітектура каналів зв'язку

Система взаємодії між безпілотним літальним апаратом (БПЛА) та оператором ґрунтується на комплексі комунікаційних каналів, які забезпечують передавання команд керування, телеметричної інформації, навігаційних даних, а також потокового відео. Типова архітектура такої системи включає такі компоненти:

Наземна станція керування (Ground Control Station, GCS) – програмно-апаратний комплекс, що генерує команди керування, приймає дані та візуалізує параметри польоту. Бортовий модуль зв'язку – радіомодуль або комунікаційний блок, інтегрований у дрон для забезпечення бездротового обміну. Канали зв'язку – радіочастотні, стільникові або супутникові лінії зв'язку, через які здійснюється передавання інформації. Протоколи обміну – стандартизовані формати даних, що регламентують структуру пакетів, методи адресації, підтвердження отримання та перевірку цілісності інформації. Архітектура повинна забезпечувати стабільність роботи навіть за умов радіоперешкод, коливань потужності сигналу чи обмеженої пропускної здатності, що є критично важливим для безпеки польоту.

2.2. Канали керування та телеметрії

Канал керування передає команди від оператора до системи автопілота БПЛА. У сучасних безпілотних системах застосовуються цифрові методи модуляції, такі як FHSS, DSSS, OFDM, що забезпечують підвищену помехостійкість та

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабільність роботи.

FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) II

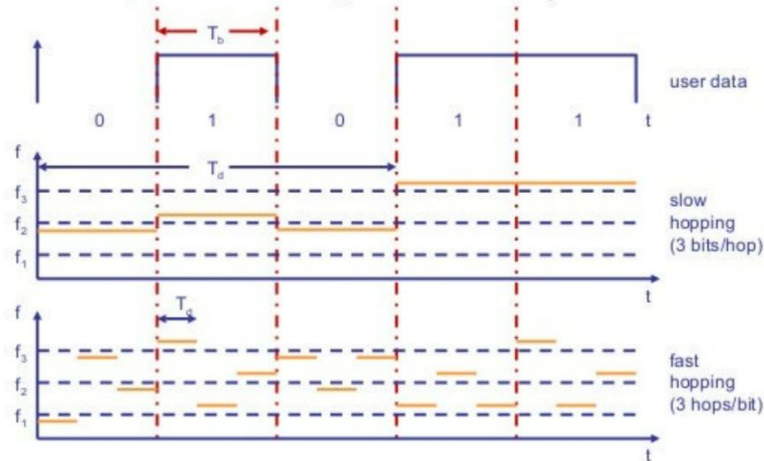


Рис. 2. 5 — FHSS модуляція

DSSS illustration

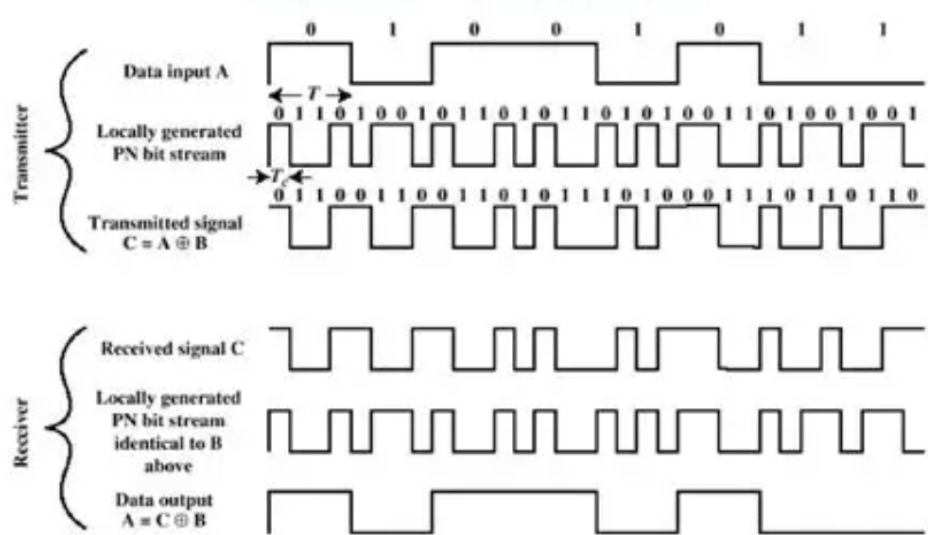


Рис. 2. 6 — DSSS модуляція

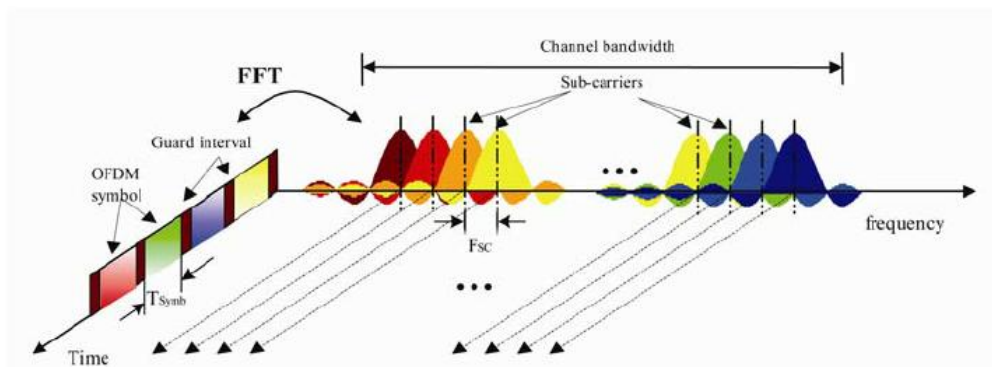


Рис. 2. 7 — FFT модуляція

Основні характеристики каналу керування:

Мала затримка передачі (10–40 мс), необхідна для коректного та безпечного дистанційного керування.

Невеликий обсяг переданих даних – зазвичай 5–50 Кбіт/с, оскільки команда складається з коротких параметрів.

Стійкість до перешкод завдяки застосуванню корекції помилок та повторної відправки пакетів.

Телеметричний канал забезпечує передавання на землю інформації про стан платформи: координати, висоту, швидкість, стан батареї, температуру компонентів, навантаження двигунів, дані навігаційних сенсорів тощо. Для цього здебільшого використовуються модеми діапазонів 433 МГц, 868 МГц, 915 МГц, які забезпечують далекодійну передачу з мінімальним енергоспоживанням.

2.3. Системи відеотрансляції

Потокове відео є найбільш об’ємним видом даних, що передаються від БПЛА до оператора. Для цього застосовуються окремі радіоканали, що працюють у діапазонах 2,4 ГГц, 5,8 ГГц, а також у ширших діапазонах для професійних моделей. Сучасні дрони використовують стандарти стиснення відео H.264, H.265, що дозволяють знизити навантаження на канал без суттєвої втрати якості.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Основні вимоги до відеоканалу:

Пропускна здатність від 2 до 20 Мбіт/с залежно від роздільності.

Мінімальна затримка – від 100 до 200 мс для FPV-режиму.

Підтримка адаптивного бітрейту для роботи в умовах змінної якості каналу.

Корекція помилок (FEC), що зменшує вплив пакетних втрат.

У професійних системах використовуються фірмові протоколи (наприклад, DJI OcuSync), які дозволяють отримувати відео високої чіткості на великих відстанях.

2.4. Технології та типи каналів зв'язку

У системах зв'язку для дронів застосовуються такі основні технології:

1. Радіоканал прямої видимості (LOS)

Базується на класичних радіочастотних модуляціях та забезпечує дальність від кількох сотень метрів до 10 км. Використовується в більшості побутових і професійних БПЛА.

2.5 Стільникові мережі (4G/5G)

Забезпечують фактично необмежену дальність, високу пропускну здатність, малу затримку та можливість керування дроном за межами прямої видимості. Використовуються у логістичних, інспекційних та автономних системах.

2.6. Супутниковий зв'язок (SATCOM)

Застосовується для роботи в умовах повної відсутності інфраструктури. Дає глобальне покриття, але має вищу затримку та значно дорожче обладнання.

Забезпечує високу швидкість передачі на малих дистанціях. Використовується при відеозйомці, дослідницьких роботах та тестуванні.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.6. Протоколи обміну даними

Для уніфікації формату та структури повідомлень використовуються такі протоколи:

MAVLink – відкритий протокол для передачі команд, телеметрії та навігаційних даних. Має модульну структуру та забезпечує легкість інтеграції з різними автопілотами.



Рис. 2. 8 — MAVLink модем

DJI Lightbridge / OcuSync – високоефективні комерційні протоколи, оптимізовані для відеопередачі та стабільного керування.

UDP/RTSP – використовуються для потокової передачі відео в реальному часі. З метою безпеки застосовується шифрування даних (AES, RSA), аутентифікація користувача та цифрові підписи команд, що знижує ризик перехоплення або підміни управління.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

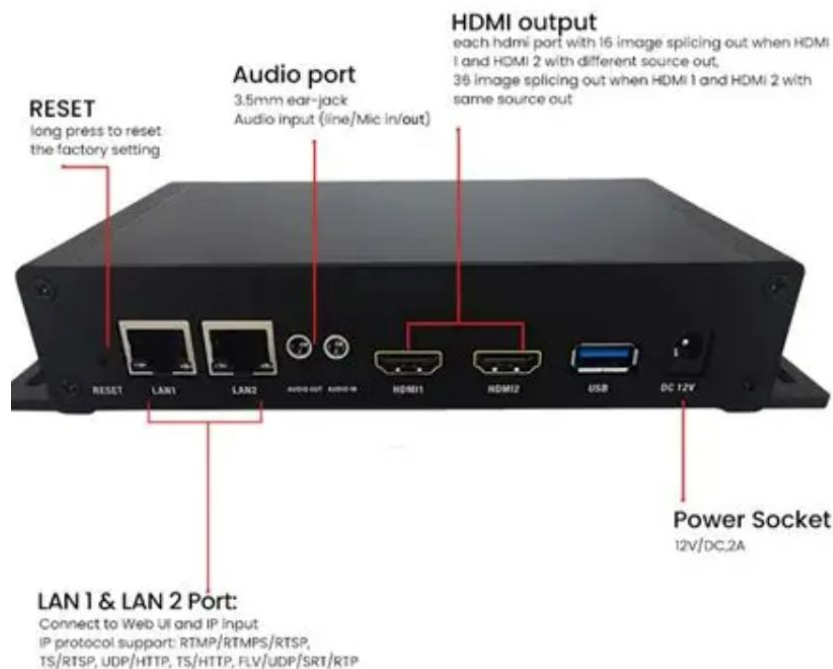


Рис. 2. 9 — UDP/RTSP модем

2.7. Надійність і відмовостійкість каналів зв'язку

Стабільність зв'язку критично впливає на безпечність експлуатації БПЛА. Для підвищення надійності систем застосовуються такі механізми:

Резервування каналів зв'язку – автоматичний перехід між радіоканалом, LTE або Wi-Fi. FailSafe-алгоритми – автономні сценарії поведінки дрона при втраті зв'язку (утримання позиції, повернення додому, контрольоване зниження).

Дуплексна структура каналів – одночасна передача команд та прийом телеметрії.

Адаптивне керування частотою і потужністю для зменшення впливу зовнішніх перешкод.

Деякі сучасні системи використовують алгоритми прогнозування стабільності каналу, що дозволяють завчасно визначати можливу втрату сигналу.

2.10 Перспективи розвитку систем передачі даних

Подальший розвиток систем зв'язку для дронів пов'язаний з такими напрямками:

впровадження технологій 5G/6G, що забезпечать наднизьку латентність (1–5 мс) та високу швидкість;

використання масових супутникових угруповань для глобального покриття;

застосування когнітивного радіо для динамічного вибору вільних частот;

розвиток систем MIMO для підвищення пропускної здатності;

вдосконалення протоколів шифрування та захисту від перехоплення.

Розвиток технологій передачі даних прямо впливає на рівень автономності дронів та розширює можливості їх використання в промисловості, безпеці та логістиці.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.МЕТОДИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИЧНОЇ НАВІГАЦІЇ В БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ

Оптична навігація є ключовою технологією підвищення автономності та точності позиціонування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), особливо у середовищах зі слабким або недоступним сигналом глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Використання камер, глибинних сенсорів, лідарів та алгоритмів комп'ютерного зору дозволяє дронам виконувати орієнтацію, стабілізацію та маневрування, формувати карти місцевості та здійснювати польотні місії з високим рівнем автономності.

У цьому розділі розглянуто основні методи оптичної навігації, їхні технічні принципи, алгоритмічні підходи та практичні застосування в БПЛА.

3.1 . Методи оптичної навігації

Візуальна одометрія (VO, Visual Odometry) — це метод оцінювання траєкторії руху БПЛА за серією зображень, отриманих з камери. Принцип роботи ґрунтується на відстеженні переміщення характерних точок або аналізі зміни інтенсивностей пікселів між кадрами.

Візуальна одометрія поділяється на такі типи:

- монокулярна — використовує одну камеру; проста, але схильна до масштабної неоднозначності;
- стереоскопічна — використовує пару синхронізованих камер; забезпечує визначення глибини та більш високу точність;
- RGB-D — працює з камерами, які одночасно фіксують колірну та глибинну інформацію.

Алгоритмічні підходи включають:

- методи виділення та відстеження ознак (SIFT, SURF, ORB);
- пряму одометрію (Direct VO), де аналізується зміна інтенсивностей без попереднього пошуку ознак.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

VO є основою стабілізації, локальної навігації в приміщенні та короткочасного позиціонування в умовах втрати GPS.

3.2. Візуально-інерційна одометрія (VIO)

VIO поєднує дані камери та інерціального модуля (IMU), що дозволяє компенсувати недоліки кожного сенсору окремо. Камера забезпечує високоточну просторову інформацію, у той час як IMU дає швидкі динамічні зміни руху.

Типові системи VIO використовують:

- фільтрацію (Extended Kalman Filter);
- оптимізацію траєкторії в ковзному вікні (Sliding Window Optimization);
- комбіновані підходи (наприклад, VINS-Mono, VINS-Fusion).

У дронах VIO застосовується для стабілізації польоту, польоту в приміщеннях та зльоту/посадки в складних умовах.

3.3. Візуальна навігація на основі SLAM

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) — це метод, що дозволяє дрону одночасно будувати карту навколишнього середовища та визначати власне місцезнаходження в ній.

Основні типи SLAM:

- візуальний SLAM (Visual SLAM) — використовує камери;
- візуально-інерційний SLAM (VI-SLAM) — комбінує камеру та IMU;
- лідарний SLAM (LiDAR SLAM) — використовує лазерний сканер.

Популярні реалізації: ORB-SLAM, LSD-SLAM, DSO, LIO-SAM.

SLAM є фундаментом для довготривалої навігації, автономного картографування та планування траєкторій.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.4. Оптичний потік

Метод оптичного потоку визначає поле швидкостей зміщення пікселів між послідовними кадрами. Найбільш поширені алгоритми:

- Лукаса–Канаде;
- Хорна–Шунка;
- Pyramidal Lucas–Kanade.

У БПЛА оптичний потік застосовується для:

- стабілізації висоти та положення;
- навігації на малих висотах;
- аналізу відносної швидкості руху.

Багато комерційних квадрокоптерів мають спеціальні оптичні сенсори знизу саме для стабілізації за допомогою потоку.

3.5. Навігація за візуальними орієнтирами

Цей метод передбачає використання спеціальних або природних орієнтирів для визначення положення дрона. До спеціальних маркерів відносять:

- ArUco;
- AprilTag;
- QR-коди.

Природні орієнтири включають унікальні елементи середовища: будівлі, дороги, перехрестя, контури ландшафту.

Такий підхід використовують для високоточних посадок, автономного докування та навігації в структурованих середовищах.

3.6. Оптична навігація на основі глибинних сенсорів та лідара

Для тривимірної орієнтації застосовуються:

- камери глибини (ToF, structured light);
- лазерні далекоміри;
- лідари.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лідар забезпечує високу точність визначення відстаней, особливо корисну при польотах у складних або затемнених умовах. Дані лідару можуть комбінуватися з візуальною інформацією, утворюючи гібридні навігаційні системи.

3.7. Автономний політ без GPS

Дрони можуть здійснювати навігацію у приміщеннях, тунелях, міських каньйонах, лісах та інших GPS-непридатних зонах. VO, VIO і SLAM забезпечують безперервне позиціонування. Стереокамери і лідари дозволяють будувати локальні карти та уникати зіткнень у режимі реального часу. Оптичні мітки або текстуровані поверхні застосовуються для автоматичної посадки на платформи, транспортні засоби або зарядні станції.

3.8. Картографування та 3D-моделювання

Оптичні сенсори забезпечують:

- реконструкцію місцевості,
- побудову 3D-карт,
- інспекцію об'єктів інфраструктури.

Це широко використовується у геодезії, агромоніторингу та промисловій діагностиці. Оптичний потік і VIO критичні для підтримання стабільного положення дрона при вітрі, різких маневрах та польотах на малих висотах.

3.9. Навігація в роях БПЛА

Оптичні методи дозволяють дронам координувати рух, уникаючи зіткнень і підтримуючи формацію. Оптична навігація є однією з найперспективніших технологій автономних безпілотних систем. Вона забезпечує дронам можливість безпомилково орієнтуватися у складних умовах, компенсує обмеження традиційних навігаційних засобів та розширює спектр можливих застосувань. Розвиток алгоритмів комп'ютерного зору, нейронних мереж і

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

глибинних сенсорів сприятиме подальшому вдосконаленню методів оптичної навігації та підвищенню рівня автономності БПЛА.

3.10. Навігація на основі візуальної одометрії

Візуальна одометрія (англ. Visual Odometry, VO) є сучасним методом оцінювання переміщення мобільних робототехнічних систем на основі аналізу послідовності зображень, отриманих із відеокамери. На відміну від традиційних навігаційних засобів, таких як глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) або інерціальні вимірювальні модулі (IMU), візуальна одометрія використовує виключно візуальну інформацію для відстеження траєкторії руху, що дає змогу застосовувати її в умовах відсутності або ненадійності зовнішніх навігаційних сигналів.

Основна ідея полягає у визначенні лінійного та кутового зміщення камери на основі аналізу змін у зображеннях між послідовними кадрами. Робота методу нагадує біологічний механізм оцінювання переміщення людиною або твариною за допомогою зору.



Рис. 3.1. Ingenuity

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.11. Принципи роботи візуальної одометрії

Процес визначення переміщення за допомогою візуальної одометрії складається з кількох основних етапів.

Камера формує послідовність кадрів із певною частотою. Перед подальшою обробкою зображення можуть проходити фільтрацію шумів, корекцію дисторсії та нормалізацію яскравості, що підвищує точність виявлення ключових точок.

3.12. Виявлення та опис ключових точок

Для подальшого порівняння зображень необхідно виділити значущі точки, які легко розпізнати на кількох кадрах. Для цього використовують такі алгоритми:

FAST, Harris — для виявлення кутових точок;

ORB, SIFT, SURF — для створення інформативних дескрипторів.

Ключові точки повинні бути інваріантними до змін освітлення та масштабу, а також стійкими до шумів.

3.13. Встановлення відповідностей між кадрами

На цьому етапі відбувається пошук відповідних точок на двох послідовних кадрах. Зміна їхнього положення дозволяє визначити напрям і величину переміщення камери. Для підвищення точності часто застосовуються методи відсікання хибних відповідностей, зокрема RANSAC.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

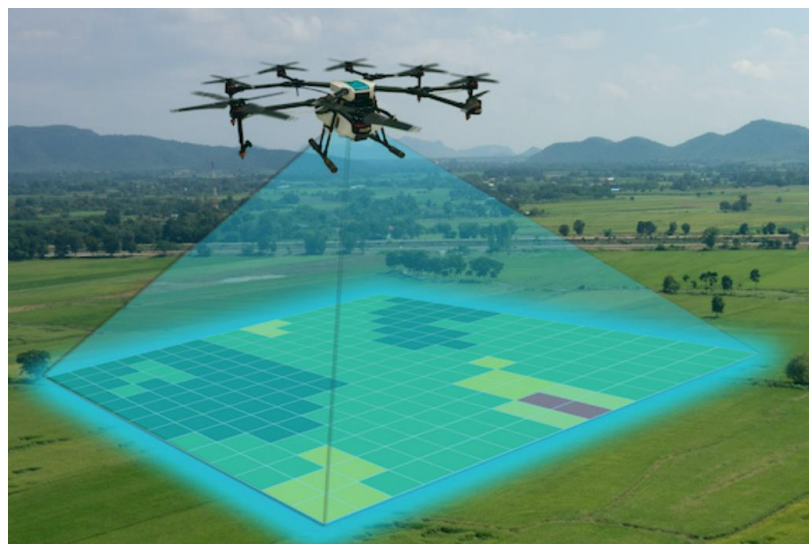


Рис. 3. 2 — Виявлення та опис ключових точок

3.14. Оцінювання руху камери

На основі знайдених відповідностей оцінюються параметри зміни положення камери:

вектор трансляції,
матриця обертання.

У залежності від використовуваної камери застосовуються різні математичні моделі. Для монокулярної камери обчислюється фундаментальна або есенціальна матриця, для стереосистем і камер глибини — безпосередньо реконструюється тривимірна структура сцени, що дозволяє визначити масштаб руху без додаткових припущень.

3.15. Формування траєкторії руху

Після обчислення локальних змін положення вони інтегруються у глобальну траєкторію. Зазвичай цей процес супроводжується накопиченням похибок, що вимагає використання методів їхнього придушення — фільтрації, оптимізації або поєднання з іншими сенсорами.

3.16. Класифікація систем візуальної одометрії

Використовує одну камеру. Має найнижчу вартість реалізації, проте не дозволяє однозначно визначити масштаб руху, що призводить до так званого масштабного дрейфу. Для підвищення точності часто поєднується з IMU — такі системи відомі як VIO (Visual-Inertial Odometry).

3.17. Стереоскопічна одометрія

Використовує дві синхронізовані камери з фіксованою базою. Дає змогу визначати глибину сцени з високою точністю та суттєво зменшити накопичення похибки.

3.18. Одометрія на основі камер глибини

У таких системах застосовують RGB-D камери, що надають одночасно зображення та карту глибини. Це дозволяє покращити точність у приміщеннях і спростити оцінювання положення, проте вимагає більшої обчислювальної потужності.

3.19. Переваги

незалежність від GNSS;

можливість роботи у приміщеннях та складних умовах навколишнього середовища;

висока точність на невеликих відстанях;

доступність обладнання, оскільки сучасні камери є порівняно дешевими.

3.20. Недоліки

чутливість до змін освітлення та низької текстурованості сцени;

зниження точності при швидких рухах, що спричиняють розмиття;

накопичення похибок під час інтегрування траєкторії;

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

висока обчислювальна складність.

3.21. Сучасні підходи та тенденції розвитку

Останніми роками активно розвиваються методи візуально-інерціальної одометрії (VIO), у яких дані з камер поєднуються з вимірюваннями IMU. Це дозволяє суттєво знизити дрейф та підвищити стабільність системи в умовах поганої видимості. Прикладами сучасних алгоритмів є ORB-SLAM3, VINS-Mono, OKVIS та інші.

Іншим напрямом є застосування методів глибокого навчання для оцінювання руху та глибини без необхідності уявної реконструкції сцени, що відкриває можливості для створення автономних систем нового покоління.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ВИБІР ЕЛЕКТРОННИХ КОМПЛЕКТУЮЧИХ

4.1. Вибір контролера

Опис мікроконтролерного модуля ESP32-WROOM



Рис. 4. 1. ESP32-WROOM

Модуль ESP32-WROOM — це високопродуктивний інтегрований модуль на базі мікроконтролера ESP32 від компанії Espressif Systems. Він призначений для створення бездротових пристроїв та IoT-систем, поєднуючи в собі високу обчислювальну потужність, низьке енергоспоживання та розвинені комунікаційні можливості.

Архітектура та продуктивність

У основі модуля знаходиться мікросхема ESP32, яка містить: двоядерний 32-бітний процесор Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц; співпроцесор ULP (Ultra Low Power) для виконання задач у режимі низького енергоспоживання;

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вбудовані периферійні інтерфейси та аналогові модулі.

Завдяки потужному процесору модуль здатний виконувати одночасно як мережеві, так і локальні задачі обробки даних.

Пам'ять

Модуль має:

448 КБ SRAM для програмних та робочих даних,
зовнішню SPI-флеш-пам'ять (зазвичай 4 або 8 МБ, залежно від версії),
підтримку розширеного адресного простору для великих прошивок.

Бездротові можливості

ESP32-WROOM забезпечує:

Wi-Fi 802.11 b/g/n з підтримкою режимів AP, STA та AP+STA;

Bluetooth 4.2 BR/EDR та Bluetooth Low Energy (BLE).

Це дозволяє використовувати модуль у широкому спектрі IoT-пристроїв, включаючи сенсорні мережі, контролери розумного дому, телеметрію та мобільні застосунки.

Периферія та інтерфейси

ESP32-WROOM підтримує великий набір периферійних інтерфейсів:

GPIO (до 34 портів);

SPI, I²C, I²S;

UART (до 3 інтерфейсів);

PWM, RMT, SPI DMA;

12-битний АЦП (18 каналів);

2 канали ЦАП (8-битний);

сенсорні ємнісні входи (Touch).

Ця різноманітність дає можливість легко інтегрувати модуль з датчиками,

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виконавчими пристроями та іншою електронікою.

Енергоспоживання

Модуль підтримує кілька режимів енергозбереження:

Active Mode — повна продуктивність процесора,

Modem-sleep — вимкнення Wi-Fi при збереженні роботи CPU,

Light-sleep — мінімальне споживання з активними таймерами,

Deep-sleep — наднизьке споживання з роботою лише ULP.

Оптимізація енергоспоживання робить ESP32-WROOM придатним для автономних та батарейних систем.

Фізичні характеристики

Компактний форм-фактор: приблизно 25×18 мм;

Вбудована РСВ-антена або можливість підключення зовнішньої;

Робоча напруга живлення: 3.0–3.6 В (рекомендовано 3.3 В);

Робоча температура: –40 ... +85°C.

Застосування

ESP32-WROOM широко використовується у:

системах «розумного дому» (датчики, контролери освітлення, реле);

телеметрії та моніторингу стану обладнання;

робототехніці;

портативних пристроях із Bluetooth;

промислових та лабораторних IoT-проектах;

мультимедійних застосунках (передача аудіо через I²S, BLE).

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Опис мікроконтролерного модуля Teensy 4.1

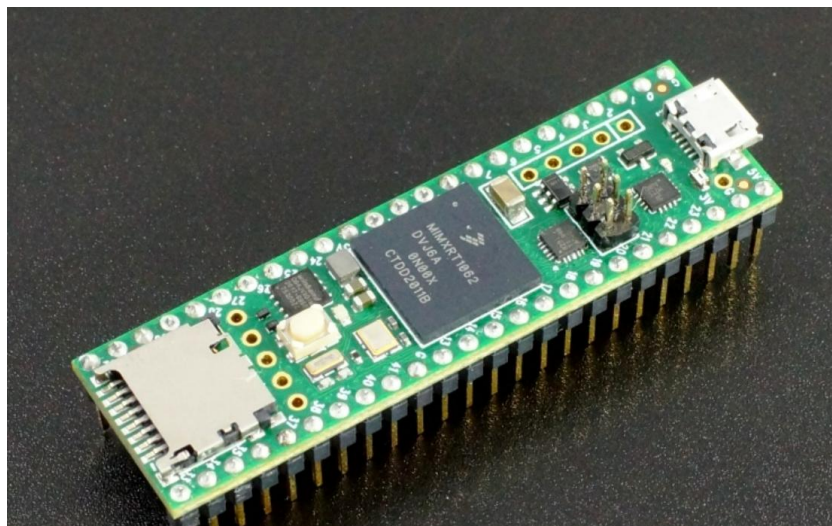


Рис. 4. 2 — Teensy 4.1

Модуль Teensy 4.1 — це високопродуктивний мікроконтролер на базі процесора ARM Cortex-M7, розроблений компанією PJRC. Він призначений для задач, що потребують високої швидкодії, обробки сигналів у реальному часі та широкого набору периферії для роботи з різноманітними датчиками, двигунами та комунікаційними інтерфейсами.

Архітектура та продуктивність

У основі Teensy 4.1 знаходиться процесор:

ARM Cortex-M7 32-біт, тактова частота до 600 МГц;

6-ступенева конвеєрна архітектура з високою продуктивністю для обчислень у реальному часі;

підтримка DSP-інструкцій та апаратного прискорення для роботи з сигналами і мультимедіа.

Мікроконтролер забезпечує значно більшу продуктивність порівняно з традиційними Arduino або ESP32, що дозволяє виконувати складні алгоритми

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

керування, обробки сенсорних даних та генерації звуку в реальному часі.

Пам'ять

Teensy 4.1 має:

1 МБ SRAM для робочих даних;

8 МБ (зовнішня QSPI) флеш-пам'ять, що дозволяє зберігати великі програми і дані;

підтримку зовнішньої пам'яті через SD-карту або SPI Flash.

Периферія та інтерфейси

Модуль підтримує широкий спектр периферійних інтерфейсів:

Digital I/O: до 55 пінів;

Analog Input (ADC): 14 каналів, 12-біт;

Analog Output (DAC): 2 канали;

UART: до 8 каналів;

SPI: до 3 каналів;

I²C: до 3 каналів;

PWM: до 35 каналів для керування двигунами та сервоприводами;

CAN Bus: 2 канали для промислових застосувань;

SD Card Interface, USB Host/Device, Touch sensing, I²S, FlexPWM.

Цей набір дозволяє Teensy 4.1 бути універсальною платформою для роботи як із сенсорними системами, так і з аудіо- та відеоапаратурою.

Бездротові можливості

Модуль сам по собі не має вбудованого Wi-Fi або Bluetooth, але легко інтегрується з зовнішніми модулями бездротового зв'язку, такими як ESP32, NRF24L01, Bluetooth-модулі тощо.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Енергоспоживання

Teensy 4.1 підтримує режими низького споживання:

Sleep Mode — мінімальне споживання при вимкненому процесорі;

Stop Mode — повне вимкнення ядра з можливістю швидкого відновлення роботи.

Через високу продуктивність у активному режимі, оптимізація енергоспоживання критично важлива для портативних проектів.

Фізичні характеристики

Компактний форм-фактор: 102 × 17 мм;

Напруга живлення: 3.6–5.5 В, рекомендовано 5 В;

Робоча температура: –40 ... +85°C;

USB-порт для програмування та живлення;

Застосування

Teensy 4.1 використовується у:

робототехніці та автоматизації;

аудіо-процесорах та синтезаторах;

системах керування двигунами;

обробці сенсорних даних у реальному часі;

промислових та лабораторних IoT-проектах;

інтерактивних інсталяціях та мультимедійних пристроях.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

4.2. Вибір дисплея

Основні характеристики дисплея го дисплея 2.8" ILI9341 320×240 Color TFT Touchscreen

Діагональ екрану: 2.8 дюйма. Роздільна здатність: 320 × 240 пікселів (RGB, TFT).



Рис. 4. 3 — ILI9341 320×240 Color TFT

Кольоровість: дисплей підтримує ~65 000 кольорів (RGB 16-bit / 65K color).

Елесcrow

Контролер: ILI9341 — один із найпоширеніших драйверів для TFT-дисплеїв такого формату.

Інтерфейс: SPI (Serial Peripheral Interface) — зручно для підключення до Teensy або інших мікроконтролерів, оскільки займає мінімальну кількість I/O-виходів.

Напруга живлення: зазвичай 3.3 V або 5 V (залежить від модуля), логічні сигнали — 3.3 V TTL.

Активна область (дійсна площа екрану): приблизно 43.2 × 57.6 мм.

Shenzhen Jingcai Intelligent Co., Ltd.

Чому цей дисплей гарний для Teensy 4.1

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдяки інтерфейсу SPI має сенс для Teensy, оскільки SPI легко реалізувати, не займаючи занадто багато виводів, і часто Teensy має достатню кількість пінів.

Із роздільною здатністю 320×240 — вистачає для графічного інтерфейсу, меню, відображення даних, базової графіки або навіть простих графічних елементів.

Кольоровий TFT + ILI9341 дають змогу відображати зображення, графіки, графічні меню — не лише текст чи цифри.

Форм-фактор 2.8" — компактний, зручно вбудувати у корпус, панель, пристрій на Teensy, не займає багато місця.

Є популярні готові бібліотеки для ILI9341, що спрощують програмування (вивід тексту, графіки тощо). Наприклад, такий дисплей часто рекомендований саме для Teensy 4.1.

Відображати меню, графічний інтерфейс, налаштування, дані з сенсорів або стан системи.

Робити невеликий пристрій на Teensy зі зручною візуалізацією: керування, контролер, прилад, панель.

Використовувати дисплей із мінімальним числом пінів, щоб зберегти вільні GPIO для інших модулів (датчики, виконавчі, комунікації).

Мати кольорову графіку — не лише монохром чи текст.

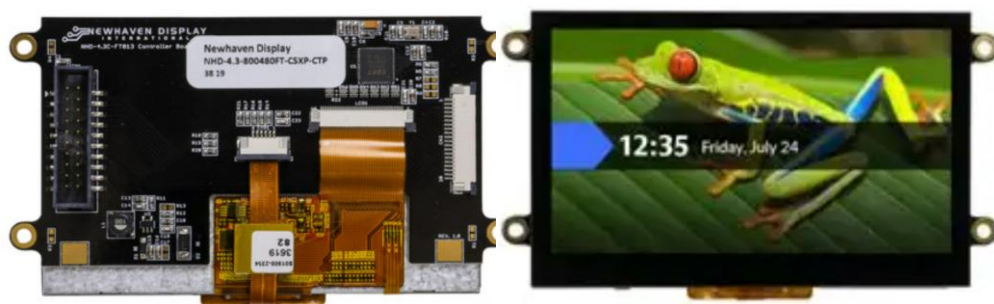


Рис. 4. 4 —NewHaven 4.3" IPS TFT

Діагональ: 4.3 дюйма.

Роздільна здатність: 800 × 480 пікселів (WQVGA / WVGA) для версій з високою чіткістю.

Тип матриці: IPS — що дає хороші кути огляду, контраст, яскравість і якісну передачу кольорів.

Кольори: 24-біт true color (RGB).

Інтерфейс: зазвичай 24-біт паралельний RGB (TFT + RGB-шина) для моделей без HDMI.

newhavendisplay.com

Backlight / підсвітка: біла LED-підсвітка, досить яскрава (для деяких версій — дуже висока яскравість, придатна навіть для сонячного світла).

Живлення: для TFT — ~ 3.3 V (логіка), backlight — відповідний LED-драйвер (залежно від модуля).

Розміри активної області: близько 95.04 × 53.86 мм.

Можливості сенсорного екрану: в деяких версіях є capacitive touch (мультитач) з контролером, що дозволяє робити сенсорний інтерфейс.

Кут огляду та контраст: завдяки IPS — повні кути огляду, стабільна передача кольору під нахилом, гарна контрастність.

Переваги та коли варто використовувати

Великий і чіткий екран 800×480 + IPS — підходить якщо потрібна гарна графіка, іконки, GUI, меню, зображення сенсорів, візуалізація даних.

24-біт кольори + хороша передача кольору дають змогу робити приємний інтерфейс (не лише текст, а й графіку, графіки, діаграми тощо).

Можливість сенсорного керування (capacitive touch) — зручно для інтерфейсів, меню, налаштувань, керування прямо з екрану.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Достатня яскравість / IPS + підсвітка — екран залишається читабельним навіть при яскравому освітленні чи якщо корпус не повністю закритий.

Відносно компактний розмір (4.3") — баланс між “великим екраном” і “компактним корпусом / платою”.

Нюанси / на що звернути увагу

Інтерфейс — часто паралельний RGB, не SPI. Для мікроконтролера / плати потрібно мати достатньо виводів / ресурсів, щоб правильно “прикрутити” таке підключення.

Сенсорні версії можуть потребувати додаткових сигналів (контролера сенсора, I2C чи іншого) для роботи сенсорного шару.

Підсвітка і живлення — треба враховувати: backlight часто потребує окремого живлення або драйвера, не просто логічного 3.3 V.

Для простих проєктів “лише текст / цифри” — 4.3” іноді надмірний, можливо більш компактні дисплеї з SPI/pixel-driven будуть легшими в підключенні.

Для якого мікроконтролера / задач підходить

NewHaven 4.3” — хороша опція якщо твій проєкт на Teensy 4.1 або подібному MCU і передбачає:

Графічний інтерфейс (GUI), меню, налаштування.

Відображення складних даних — графіки, гістограми, візуалізація сенсорів чи систем.

Сенсорне керування (якщо потрібне).

Бажання мати “екран середнього розміру” — не маленький OLED, але не монітор.

Послідовний інтерфейс Queued SPI (QSPI). Наведено основні технічні

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

характеристики цього інтерфейсу та його особливості, розглянуто структурну схему модуля QSPI та надано її короткий опис, розглянуто сигнальний рівень, а також наведено порівняльний аналіз SPI та QSPI. Також представлені приклади мікросхем з використанням цього інтерфейсу.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

5. QSPI ІНТЕРФЕЙС

Інтерфейс QSPI є повнодуплексним синхронним послідовним інтерфейсом, призначеним для зв'язку з периферійними пристроями та іншими обчислювальними пристроями. Основна ідея QSPI полягає в мінімізації участі центрального процесора у керуванні інформаційним обміном між ведучим та веденим.

До складу модуля QSPI входять чотири регістри керування (див. Рисунок 1, Control registers), один регістр стану та блок статичної оперативної пам'яті (СОЗП) обсягом 80 байт (обсяг пам'яті залежить від реалізації). Центральний процесор має повний доступ до всіх регістрів та ОЗП модуля QSPI. Для детальнішого опису програмної моделі модуля QSPI слід звертатися до опису конкретного типу мікроконтролера (МК) або процесора. Модуль інтерфейсу QSPI має 7 сигнальних ліній: MISO, MOSI, SCK, PCS [3:0]. Лінії PCS [3:0] – ці 4 сигнали забезпечують модулю інтерфейсу QSPI вибір периферійних пристроїв. Сигнал nSS/PCS0 є двонаправленим, але може бути налаштований на введення в режимі підлеглого. По лінії SCK передається сигнал синхронізації, його можна налаштувати в режимі ведучого як вихід, а в режимі підлеглого як вхід. По лінії MISO передаються дані, в режимі ведучого працює на введення даних у модуль QSPI, а в режимі підлеглого – на виведення даних. Відповідно лінія MOSI навпаки. Функціональне призначення зовнішніх сигнальних ліній та відповідні їм режими роботи наведені в таблиці

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Найменування інтерфейсу QSPI

Таблиця 4.1.

№ п./п.	Наименование вывода	Обозначение	Режим работы	Выполняемая функция
1	Ведущий – вход	MISO	Ведущий	Вход данных в модуль QSPI
	Ведомый – выход		Ведомый	Выход данных из модуля QSPI
2	Ведущий – выход	MOSI	Ведущий	Выход данных из модуля QSPI
	Ведомый – вход		Ведомый	Вход данных в модуль QSPI
3	Синхронизации	SCK ¹	Ведущий	Выход синхр. из модуля QSPI
			Ведомый	Вход синхр. в модуль QSPI
4	Выбор микросхемы	PCS[3:1]	Ведущий	Выходы выбора периферийных устройств
5	Выбор микросхемы ²	PCS0/ nSS	Ведущий	Выход выбора периферии
	Выбор ведомого ³		Ведомый	Вход выбора QSPI
6	Выбор ведомого ⁴	nSS	Ведущий	Может использоваться как признак неисправности

Особливості QSPI:

- можливість попередньо програмувати до 16 передач;
- можливість програмувати до 4 ліній вибору чіпа, що дозволяє підключати до 16 чіпів;
- автоматичний режим сканування підключених периферійних пристроїв;
- програмована довжина передачі від 8 до 16 біт включно;
- програмована затримка передачі від 1 мкс до 0,5 мс;
- програмований буферний вказівник;
- здатність безперервно передавати до 256 біт (32 байти або 16 слів).

Програмований буфер дозволяє QSPI виконувати до 16 послідовних передач без втручання процесора. Кожна передача відповідає запису, що містить усю необхідну інформацію в буфері для самостійного завершення обміну інформацією. Ця унікальна функція суттєво знижує навантаження процесора, що призводить до підвищення загальної продуктивності системи.

Наявність 4 програмованих ліній вибору чіпа дозволяє отримувати доступ до 16 незалежних периферійних пристроїв, але для цього потрібен декодер. Однак чотири периферійні пристрої можуть працювати за допомогою прямого з'єднання. Ця функція значно спрощує взаємодію двох або більше

					<i>МКАТ.480.015.019.-ПЗ.</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

периферійних пристроїв, що також усуває потребу в процесорі.

Режим автоматичного сканування для підключених периферійних пристроїв, що дозволяє безперервно та повторювано записувати буфери. Нові дані заміняють пізніші дані, тому підключені периферійні пристрої відображаються в пам'яті процесора.

Кількість послідовних бітів програмується від 8 до 16 біт включно. Наприклад, 10-бітний режим може використовуватися для зв'язку з зовнішнім 10-бітним АЦП. Ця функція спрощує взаємодію з послідовними периферійними пристроями, які потребують різної довжини даних.

Програмовану затримку передачі можна встановити від 1 до 500 мкс. Як і в попередньому випадку, цю функцію можна використовувати при роботі з АЦП, де потрібен час для перетворення сигналу. Програмована затримка передачі також спрощує послідовні периферійні пристрої.

Інтерфейсний модуль QSPI має вказівник, який визначає розташування буфера. Таким чином, можливість сегментації буфера дозволяє виконувати кілька завдань.

Режим безперервної передачі дозволяє користувачу передавати/приймати безперервний потік даних з периферійного пристрою. Мінімальна довжина — 8 біт, а максимальна — 256 біт, які можна передавати безперервно без втручання процесора. Можливі й довші транзакції, але потрібне мінімальне втручання процесора.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

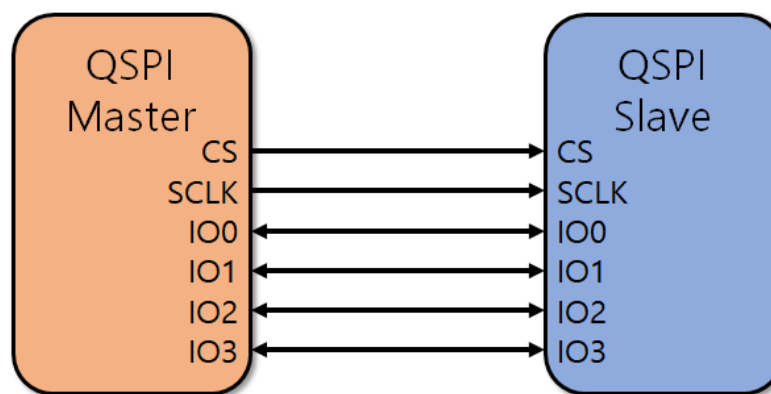


Рис. 5. 1 —Провідні канали QSPI.

Де використовується QSPI?

Інтерфейс QSPI використовується компанією Freescale при розробці серії MC68332 MC, а також у АЦП серій MC145050 і MC145040, але це досить давні продукти. Серед новіших розробок тієї ж компанії можна виділити МК серії Cold Fire, наприклад, MCF52223, MCF52221 та інші. Analog Devices використовує інтерфейс QSPI у АЦП, таких як AD7887, AD7888, AD7452, AD7853 та інших.

Коротко про SPI

Інтерфейс QSPI сумісний із інтерфейсом SPI, тому ці два інтерфейси дуже схожі. Іншими словами, інтерфейс QSPI — це просто розширення шини SPI. Для подальшого порівняльного аналізу інтерфейсів QSPI та SPI ми надамо типові структурні діаграми зв'язків майстра SPI з одним і кількома підлеглими, які показані відповідно на рисунках 1 і 2.

6. ЦИКЛІЧНИЙ НАДЛИШКОВИЙ КОНТРОЛЬ

CRC-8 (Cyclic Redundant Check)

CRC-8 — це алгоритм контрольної суми, який використовується для перевірки цілісності даних під час передачі або зберігання. Він формує 8-бітне значення, що дозволяє виявляти помилки у пакеті даних, наприклад, при передачі по UART, SPI, I²C, мережевих протоколах або зберіганні у пам'яті.

6.1. Принцип роботи

Вхідні дані сприймаються як бінарний поліном.

Вибирається генеруючий поліном ($G(x)$) довжиною 8 бітів, наприклад:

CRC-8-MAXIM: $x^8 + x^5 + x^4 + 1 \rightarrow 0x31$

CRC-8-CCITT: $x^8 + x^2 + x + 1 \rightarrow 0x07$

Дані діляться на цей поліном за модулем 2 (XOR без переносу), як у класичній бінарній «довільній довжині» арифметиці.

Решта від ділення — це контрольний код CRC-8 (8 біт).

Отриманий CRC додається до кінця даних і відправляється разом із пакетом.

Приймач виконує той самий алгоритм і порівнює отриманий CRC зі значенням, що прийшло. Якщо вони збігаються — дані ймовірно передані без помилок.

6.2. Основні параметри CRC-8

Ці параметри залежать від стандарту CRC-8, який використовується в конкретному протоколі.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Параметри CRC-8

Таблиця 6.1.

Параметр	Значення / Пояснення
Поліном (Polynomial)	8-бітний, визначає алгоритм CRC, наприклад, 0x07, 0x31
Initial value (початкове значення)	Стартове значення регістру CRC (часто 0x00 або 0xFF)
Input reflection	Чи відображати біти байта перед обробкою (true/false)
Output reflection	Чи відображати біти результату (true/false)
Final XOR	Додатковий XOR до результату (часто 0x00 або 0xFF)

6.3. Переваги CRC-8

Швидка перевірка даних: 8-бітна довжина достатня для невеликих пакетів (наприклад, сенсорні дані, невеликі команди).

Простота апаратної реалізації: CRC можна обчислювати як у мікроконтролерах (C, Arduino, Teensy), так і апаратно через зсувні регістри.

Виявлення помилок: CRC-8 дозволяє виявляти однобітові та деякі багатобітові помилки в пакеті даних.

Мінімальне навантаження на трафік: 1 байт CRC додає мінімум до передаваного пакета.

6.4. Використання у мікроконтролерах

У мікроконтролерах (ESP32, Teensy, STM32) CRC-8 часто застосовують:

для UART, SPI, I²C пакетів — контроль переданих байтів;

у протоколах сенсорів (наприклад, датчики температури / вологості, EEPROM);

у структурованих даних у флеш-пам'яті — щоб перевіряти, чи не пошкоджені блоки;

у промислових протоколах (MODBUS, SMBus, 1-Wire).

Приклад простого алгоритму на C (CRC-8, поліном 0x07)

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
uint8_t crc8(uint8_t *data, size_t len) {
    uint8_t crc = 0x00; // initial value
    for (size_t i = 0; i < len; i++) {
        crc ^= data[i];
        for (uint8_t j = 0; j < 8; j++) {
            if (crc & 0x80)
                crc = (crc << 1) ^ 0x07; // поліном CRC-8
            else
                crc <<= 1;
        }
    }
    return crc;
}
```

data — масив байтів, які перевіряємо;
crc — отриманий 8-бітний код, який додається до даних для перевірки на приймачі.

6.6.CRC-8 із використанням масиву значень

CRC-8 із використанням масиву значень (таблиця-lookup table) — найшвидший і найзручніший спосіб обчислення CRC у мікроконтролерах (Teensy, ESP32, STM32).

Такий метод активно використовується в протоколах, де важлива швидкість.

CRC-8 з використанням таблиці значень (lookup table)

Поліном: 0x07 (CRC-8-CCITT)

Initial value: 0x00

```
// CRC-8 (polynomial 0x07) lookup table
static const uint8_t CRC8_TABLE[256] = {
    0x00,0x07,0x0E,0x09,0x1C,0x1B,0x12,0x15,0x38,0x3F,0x36,0x31,0x24,0x23,0x2A,0x2D,
    0x70,0x77,0x7E,0x79,0x6C,0x6B,0x62,0x65,0x48,0x4F,0x46,0x41,0x54,0x53,0x5A,0x5D,
    0xE0,0xE7,0xEE,0xE9,0xFC,0xFB,0xF2,0xF5,0xD8,0xDF,0xD6,0xD1,0xC4,0xC3,0xCA,0xCD,
    0x90,0x97,0x9E,0x99,0x8C,0x8B,0x82,0x85,0xA8,0xAF,0xA6,0xA1,0xB4,0xB3,0xBA,0xBD,
    0xC7,0xC0,0xC9,0xCE,0xDB,0xDC,0xD5,0xD2,0xFF,0xF8,0xF1,0xF6,0xE3,0xE4,0xED,0xEA,
    0xB7,0xB0,0xB9,0xBE,0xAB,0xAC,0xA5,0xA2,0x8F,0x88,0x81,0x86,0x93,0x94,0x9D,0x9A,
    0x27,0x20,0x29,0x2E,0x3B,0x3C,0x35,0x32,0x1F,0x18,0x11,0x16,0x03,0x04,0x0D,0x0A,
    0x57,0x50,0x59,0x5E,0x4B,0x4C,0x45,0x42,0x6F,0x68,0x61,0x66,0x73,0x74,0x7D,0x7A,
    0x89,0x8E,0x87,0x80,0x95,0x92,0x9B,0x9C,0xB1,0xB6,0xBF,0xB8,0xAD,0xAA,0xA3,0xA4,
    0xF9,0xFE,0xF7,0xF0,0xE5,0xE2,0xEB,0xEC,0xC1,0xC6,0xCF,0xC8,0xDD,0xDA,0xD3,0xD4,
    0x69,0x6E,0x67,0x60,0x75,0x72,0x7B,0x7C,0x51,0x56,0x5F,0x58,0x4D,0x4A,0x43,0x44,
    0x19,0x1E,0x17,0x10,0x05,0x02,0x0B,0x0C,0x21,0x26,0x2F,0x28,0x3D,0x3A,0x33,0x34,
    0x4E,0x49,0x40,0x47,0x52,0x55,0x5C,0x5B,0x76,0x71,0x78,0x7F,0x6A,0x6D,0x64,0x63,
    0x3E,0x39,0x30,0x37,0x22,0x25,0x2C,0x2B,0x06,0x01,0x08,0x0F,0x1A,0x1D,0x14,0x13,
    0xAE,0xA9,0xA0,0xA7,0xB2,0xB5,0xBC,0xBB,0x96,0x91,0x98,0x9F,0x8A,0x8D,0x84,0x83,
    0xDE,0xD9,0xD0,0xD7,0xC2,0xC5,0xCC,0xCB,0xE6,0xE1,0xE8,0xEF,0xFA,0xFD,0xF4,0xF3
};
```

Функція обчислення CRC-8 з таблиці

```
uint8_t crc8_table(const uint8_t *data, size_t len) {
    uint8_t crc = 0x00; // initial value
    while (len--) {
        crc = CRC8_TABLE[crc ^ *data++];
    }
    return crc;
}
```

Приклад використання

```
uint8_t packet[] = {0x10, 0x5A, 0x33, 0x99};

uint8_t crc = crc8_table(packet, sizeof(packet));

// Тепер crc містить 8-бітний CRC
```

Замість того, щоб кожен байт 8 разів прокручувати через XOR + зсуви, ми робимо:

```
crc = TABLE[crc ^ data];
```

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це миттєво, тому:

Менше операцій, менше CPU навантаження, ідеально для швидких протоколів (UART, CAN, SPI, RS485)

Teensy 4.1 та ESP32 — дуже швидкі MCU, але навіть для них lookup-таблиці дають 3–10× приріст швидкості.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. РЕАЛІЗАЦІЯ ЗБІРКИ МОДУЛІВ СИСТЕМИ ТА ЇЇ НАЛАШТУВАННЯ.

Створена система реалізує функції збору, обробки та передачі даних за допомогою мікроконтролера ESP32-WROOM, який виконує роль центрального обчислювального вузла. Для організації далеkobійного радіозв'язку використовується модуль SX1276, що працює за технологією LoRa, забезпечуючи високу чутливість та передачу інформації на великі відстані. Виведення інформації та індикація стану системи виконується на графічному дисплеї Newhaven Display NHD-4.3", що має високий рівень контрасту та підтримує широкий спектр інтерфейсів.

Збірка цих компонентів утворює повноцінний модуль телеметрії, здатний працювати автономно та забезпечувати стійкий зв'язок у складних умовах. На малюнку нижче показано під'єднання всіх інформаційних каналів.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

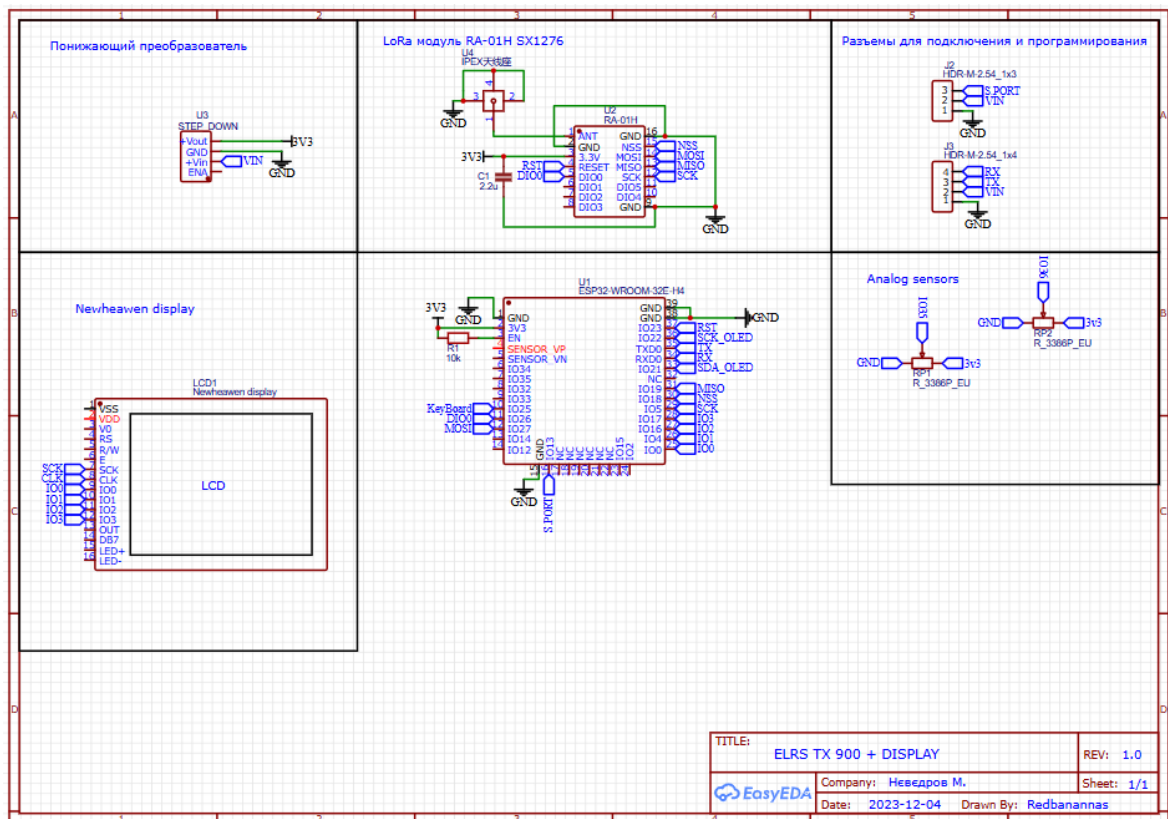


Рис. 7.1 — Электрично-принципова схема

Об'єднання ESP32, SX1276 та Newhaven NHD-4.3 дозволило створити універсальний, високопродуктивний і функціональний модуль телеметрії.

ESP32 забезпечує швидку обробку даних, SX1276 — стабільний далекобійний зв'язок, а дисплей Newhaven — зручний графічний інтерфейс.

Ця апаратна конфігурація придатна для систем моніторингу, LoRa-мереж, промислових контролерів, IoT-проектів та мобільних терміналів. На рисунку нижче наведено структурно-функціональну схему системи яка наглядно відображає взаємодію модулів.

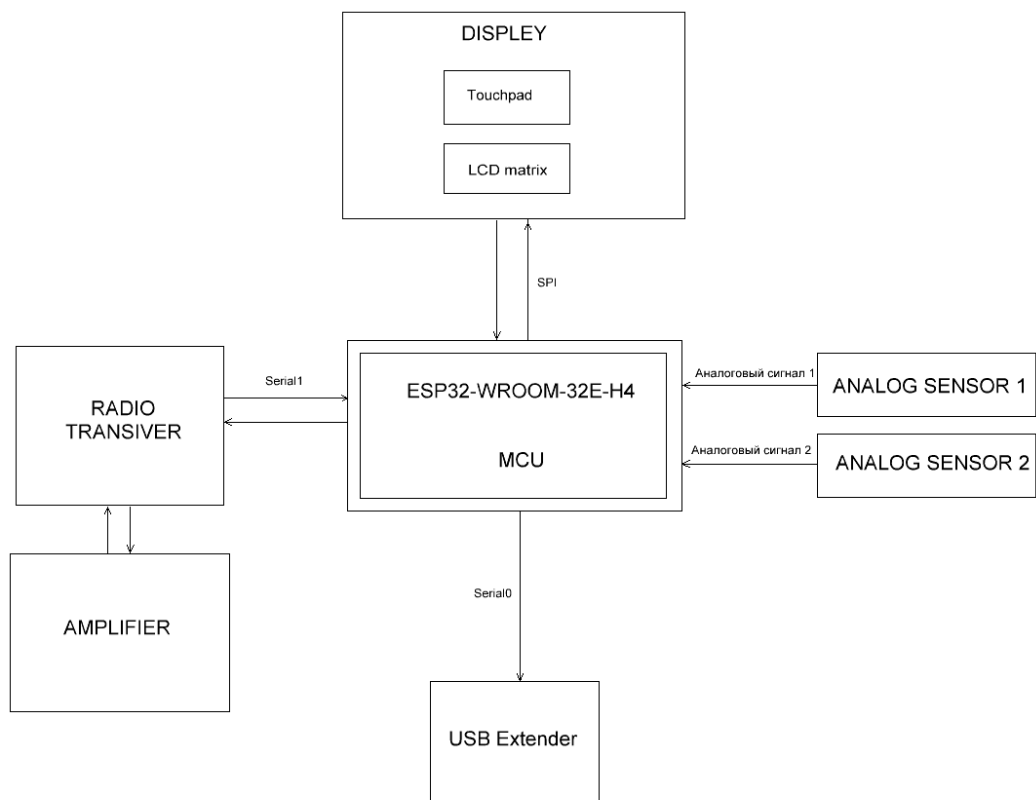


Рис. 7.2 — Функціональна схема

В результаті підключення всіх компонентів і налаштування програмного коду отримано макет комплексу системи який приймає параметри польоту та сповіщення від бпла по радіоканалу та виводить їх на дисплей. З допомогою іншого вікна яке призначене для відправки команд з пульта можна вносити зміни в керування польотом.



Рис. 7.3 — Вигляд макету виробу з виведеними параметрами.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проєкту було розроблено та досліджено комплексну систему збору, передачі та контролю даних з використанням сучасних мікроконтролерних платформ та засобів цифрової комунікації. Основну увагу приділено аналізу та практичному застосуванню контролерів ESP32-WROOM та Teensy 4.1, які завдяки високій продуктивності, енергоефективності та гнучкості інтерфейсів дозволили створити надійну та масштабовану апаратну основу системи. У роботі проведено порівняння функціональних можливостей двох мікроконтролерів, визначено їхні переваги та оптимальні сфери використання. ESP32 продемонстрував високу ефективність під час виконання задач бездротової передачі даних, тоді як Teensy 4.1, завдяки своїй високій частоті роботи та апаратній підтримці математичних операцій, був обраний як основний обчислювальний модуль системи. Для зручної індикації та взаємодії з користувачем було досліджено й адаптовано роботу графічних дисплеїв, зокрема моделей сімейства NHD 4.3” від Newhaven Display, які забезпечують високу якість зображення та сумісність з Teensy. Це дозволило реалізувати інформативний і швидкодіючий інтерфейс користувача. Особливу увагу приділено питанню надійності передавання інформації. У межах дипломного проєкту виконано аналіз і впровадження механізмів контролю цілісності даних. Зокрема, реалізовано алгоритм CRC-8, використаний як у класичному побітовому виконанні, так і в оптимізованому варіанті на основі таблиці значень (lookup table), що значно підвищило швидкодію контролю на мікроконтролері. Це забезпечило виявлення помилок під час передачі та обробки даних у реальному часі.

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ExpressLRS — офіційна домашня сторінка проекту. Опис можливостей, частот, підтримуваного обладнання. expresslrs.org+2 Вікіпедія+2
2. ExpressLRS — SPI Receivers (опис реалізації приймачів з SPI-зв'язком, обмеження пакетних режимів, сумісність з Betaflight).
expresslrs.org+2 expresslrs.org+2
3. ExpressLRS — Quick Start Guide / Getting Started (інструкція з базового налаштування передавача й приймача, прошивки, підключення).
expresslrs.org+1
4. Quad-SPI interface on STM32 microcontrollers and microprocessors (Application Note AN4760) — STMicroelectronics. PDF-мануал, опис функцій QUADSPI, режими роботи, memory-mapped, Dual/Quad I/O, DMA, XIP. [STMicroelectronics](https://www.st.com)
5. Quad-SPI (Quad SPI) — «Интерфейс QSPI — расширение классического SPI» (опис на сайті Electronic Society / esociety.ru) — загальні принципи QSPI, способи підключення периферії та FLASH-пам'яті. [Electronic society](http://esociety.ru)
6. QSPI NOR Flash Part 3 — The Quad SPI Protocol (jblopen.com) — детальний розбір протоколу QSPI / Dual / Quad / QIO / QPI, опис timing-діаграм, фаз передавання (команда, адреса, дані), специфікації для NOR-Flash пам'яті. [JBLopen](http://jblopen.com)

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Текст програми для QSPI інтерфейсу

```
//  
// This code implements software - based(bit - banded) QSPI and SPI read  
// write operations by manually toggling GPIO pins to transmit and receive 8 - , 16 - , and 32 - bit data to external  
// hardware.  
//  
  
#include "QSPI.h"  
  
void beginTransaction() {  
  
    pinMode(CS, OUTPUT);  
    pinMode(IO0_MOSI, OUTPUT);  
    pinMode(SCK, OUTPUT);  
    pinMode(IO1_MISO, INPUT);  
  
    pinMode(IO3, OUTPUT);  
    pinMode(IO2, OUTPUT);  
  
    digitalWrite(CS, 1);  
    digitalWrite(IO0_MOSI, 1);  
  
};  
  
uint8_t bitBangData(const uint8_t send) { // This function transmit the data via bitbanging  
  
    int8_t receive = 0;
```

					МКАТ.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

for (int i = 7; i >= 0; i--) // 8 bits in a byte
{
    //digitalWriteFast
    digitalWrite(IO0_MOSI, bitRead(send, i)); // Set MOSI
    delayMicroseconds(halfperiod(freq));

    digitalWrite(SCK, HIGH); // SCK high
    bitWrite(receive, i, digitalRead(IO1_MISO)); // Capture MISO
    delayMicroseconds(halfperiod(freq));

    digitalWrite(SCK, LOW); // SCK low
}

digitalWrite(IO0_MOSI, 1); // Set MOSI
delayMicroseconds(halfperiod(freq));

return receive; // Return the received data
}

void bitBangDataQSPI(const uint8_t send) { // This function transmit the data via bitbanging

    pinMode(IO0_MOSI, OUTPUT);
    pinMode(IO1_MISO, OUTPUT);
    pinMode(IO3, OUTPUT);
    pinMode(IO2, OUTPUT);

    digitalWriteFast(IO0_MOSI, bitRead(send, 4)); //1 0 0 1
    digitalWriteFast(IO1_MISO, bitRead(send, 5)); //1 1 0 1
    digitalWriteFast(IO2, bitRead(send, 6)); //0 0 0 1
    digitalWriteFast(IO3, bitRead(send, 7)); //0 0 0 0

    //delayMicroseconds(halfperiod(freq));

```

					MKAT.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

for (int i = 0; i < (int)halfperiod1(freq1); i++)
{
    __asm__ volatile("nop");

}

digitalWriteFast(SCK, HIGH);
//delayMicroseconds(halfperiod(freq));

for (int i = 0; i < (int)halfperiod1(freq1); i++)
{
    __asm__ volatile("nop");

}

digitalWriteFast(SCK, LOW);          // SCK low

digitalWriteFast(IO0_MOSI, bitRead(send, 0)); //0 0 0  0
digitalWriteFast(IO1_MISO, bitRead(send, 1)); //0 0 0  0
digitalWriteFast(IO2, bitRead(send, 2)); //0 0 0  1
digitalWriteFast(IO3, bitRead(send, 3)); //0 0 0  1

//delayMicroseconds(halfperiod(freq));

for (int i = 0; i < (int)halfperiod1(freq1); i++)
{
    __asm__ volatile("nop");

}

digitalWriteFast(SCK, HIGH);          // SCK high
//delayMicroseconds(halfperiod(freq));

for (int i = 0; i < (int)halfperiod1(freq1); i++)
{

```

					MKAT.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        __asm__ volatile("nop");

    }

    digitalWriteFast(SCK, LOW);          // SCK low
}

uint8_t bitBangDataReadQSPI() {

    int8_t receive = 0;

    pinMode(IO0_MOSI, INPUT);
    pinMode(IO1_MISO, INPUT);
    pinMode(IO3, INPUT);
    pinMode(IO2, INPUT);

    for (int i = 0; i < (int)halfperiod1(freq1); i++)
    {
        __asm__ volatile("nop");

    }

    digitalWriteFast(SCK, HIGH);

    bitWrite(receive, 4, digitalReadFast(IO0_MOSI));
    bitWrite(receive, 5, digitalReadFast(IO1_MISO));
    bitWrite(receive, 6, digitalReadFast(IO2));
    bitWrite(receive, 7, digitalReadFast(IO3));

    for (int i = 0; i < (int)halfperiod1(freq1); i++)
    {
        __asm__ volatile("nop");

    }

    digitalWriteFast(SCK, LOW);

```

					MKAT.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

for (int i = 0; i < (int)halfperiod1(freq1); i++)
{
    __asm__ volatile("nop");

}

digitalWriteFast(SCK, HIGH);

bitWrite(receive, 0, digitalReadFast(IO0_MOSI));
bitWrite(receive, 1, digitalReadFast(IO1_MISO));
bitWrite(receive, 2, digitalReadFast(IO2));
bitWrite(receive, 3, digitalReadFast(IO3));
for (int i = 0; i < (int)halfperiod1(freq1); i++)
{
    __asm__ volatile("nop");

}

digitalWriteFast(SCK, LOW);

return receive;    // Return the received data
}

void write8QSPI(const uint32_t address, const uint8_t data) {

    //Serial.println(data);

    uint32_t cmd = address | WRITE;

    //SPI1.beginTransaction(FT81x_SPI_SETTINGS);
    digitalWrite(CS, 0);

    bitBangDataQSPI(cmd >> 16);
    bitBangDataQSPI(cmd >> 8);

```

					MKAT.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        bitBangDataQSPI(cmd);
        bitBangDataQSPI(data);

        digitalWrite(CS, 1);
        //SPI1.endTransaction();
    }

void write16QSPI(const uint32_t address, const uint16_t data) {

    //Serial.println(data);

    uint32_t cmd = address | WRITE;
    //SPI1.beginTransaction(FT81x_SPI_SETTINGS);
    digitalWrite(CS, 0);

    bitBangDataQSPI(cmd >> 16);
    bitBangDataQSPI(cmd >> 8);
    bitBangDataQSPI(cmd);
    bitBangDataQSPI(data);
    bitBangDataQSPI(data >> 8);

    digitalWrite(CS, 1);
    //SPI1.endTransaction();
}

void write32QSPI(const uint32_t address, const uint32_t data) {

    //Serial.println(data);

    uint32_t cmd = address | WRITE;
    digitalWrite(CS, 0);

    bitBangDataQSPI(cmd >> 16);
    bitBangDataQSPI(cmd >> 8);

```

					MKAT.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        bitBangDataQSPI(cmd);
        bitBangDataQSPI(data);
        bitBangDataQSPI(data >> 8);
        bitBangDataQSPI(data >> 16);
        bitBangDataQSPI(data >> 24);

        digitalWrite(CS, 1);

    }

uint8_t read8QSPI(const uint32_t address) {

    uint32_t cmd = address;
    digitalWrite(CS, 0);

    bitBangDataQSPI(cmd >> 16);
    bitBangDataQSPI(cmd >> 8);
    bitBangDataQSPI(cmd);

    bitBangDataReadQSPI(); // dummy
    uint8_t result = bitBangDataReadQSPI();

    delayMicroseconds(halfperiod(freq));

    digitalWrite(CS, 1);
    return result;
}

uint16_t read16QSPI(const uint32_t address) {

    uint32_t cmd = address;
    digitalWrite(CS, 0);

    bitBangDataQSPI(cmd >> 16);
    bitBangDataQSPI(cmd >> 8);

```

					MKAT.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        bitBangDataQSPI(cmd);

        bitBangDataReadQSPI(); // dummy

        uint16_t result = bitBangDataReadQSPI();
        result |= (bitBangDataReadQSPI() << 8);

        delayMicroseconds(halfperiod(freq));

        digitalWrite(CS, 1);
        return result;
    }

    uint32_t read32QSPI(const uint32_t address) {

        uint32_t cmd = address;
        digitalWrite(CS, 0);

        bitBangDataQSPI(cmd >> 16);
        bitBangDataQSPI(cmd >> 8);
        bitBangDataQSPI(cmd);

        bitBangDataReadQSPI(); // dummy

        uint32_t result = bitBangDataReadQSPI();
        result |= (bitBangDataReadQSPI() << 8);
        result |= (bitBangDataReadQSPI() << 16);
        result |= (bitBangDataReadQSPI() << 24);
        delayMicroseconds(halfperiod(freq));

        digitalWrite(CS, 1);
        return result;
    }

```

					MKAT.480.015.019.-ПЗ.	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		