

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

До захисту допущено:

В.о. зав. кафедри

_____ Михайло СТЕПАНОВ

«___» _____ 20__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньою-професійною програмою «Інтелектуальні технології мікро-
системної радіoeлектронної техніки»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
на тему: «Безпілотний авіаційний комплекс. Базова станція зв'язку»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи РІ-81

Євдокімов Даніл Олександрович

_____ Прізвище, ім'я та по батькові


_____ підпис

Керівник:

Ст. викладач. Адаменко Володимир Олексійович

_____ Посада, науковий ступінь, вчене звання, Прізвище, ім'я та по батькові


_____ підпис

Рецен-

зент:

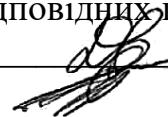
Доцент, к.т.н. Чмельов Вячеслав Орійович

_____ Посада, науковий ступінь, вчене звання, Прізвище, ім'я та по батькові

_____ підпис

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____



Київ — 2022 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Михайло СТЕПАНОВ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Євдокімову Данілу Олександровичу

1. Тема проєкту «Безпілотний авіаційний комплекс. Електронні модулі літального апарату», керівник проєкту старший викладач Адаменко Володимир Олександрович, затверджені наказом по університету від «01» червня 2022 р. № 822-с
2. Термін подання студентом проєкту 09 червня 2022 року
3. Вихідні дані до проєкту Вихідна потужність радіосигналу на рівні 10 Вт, робоча частота 2,4 ГГц, габаритні розміри в межах 100х100 мм, ретрансляція радіосигналів між елементами безпілотного авіаційного комплексу
4. Зміст пояснювальної записки Огляд аналогів, аналіз технічного завдання, розробка електронного модулю, розробка корпусу пристрою, результати розробки пристрою
5. Перелік графічного матеріалу Схема електрична принципова, друкована плата, складальний кресленник друкованого вузла, складальний кресленник пристрою
6. Дата видачі завдання 01 травня 2022 року

Календарний план

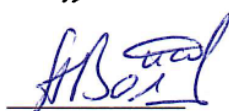
№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Узгодження ТЗ	01.06 — 02.06.2022	
2	Огляд аналогів	02.06 — 04.06.2022	
3	Розробка електронного модуля	04.06 — 14.06.2022	
4	Розробка корпусу пристрою	15.06 — 17.06.2022	
5	Формування комплекту конструкторської документації	17.06 — 20.06.2022	

Студент



Даніл ЄВДОКИМОВ

Керівник



Володимир АДАМЕНКО

АНОТАЦІЯ

Темою даного дипломного проекту є «Безпілотний авіаційний комплекс. Базова станція зв'язку».

Дипломний проект викладено на 47 сторінках, які включають, 37 ілюстрацій, 3 таблиці, 5 креслень, 12 посилань та 6 додатків.

Метою дипломного проекту є розробка базової станції зв'язку (БСЗ) зі складу безпілотного авіаційного комплексу (БАК), яка дозволяє збільшити ефективний радіус керування безпілотним літальним апаратом (БЛА) за допомогою пульта дистанційного керування (ПДК) та покращити загальну стабільність зв'язку між БЛА та ПДК шляхом ретрансляції радіосигналів між елементами БАК.

Даний пристрій дозволяє збільшити ефективний радіус керування БЛА до 20 км у межах прямої видимості з точки розміщення БСЗ, залежно від погодних умов та навколишнього середовища.

Ключові слова : безпілотний авіаційний комплекс, безпілотний літальний апарат, базова станція зв'язку, пульт дистанційного керування, ретрансляція радіосигналів, мікроконтролер, цифрова обробка сигналів.

ANNOTATION

The topic of this diploma project is "Unmanned aerial system. Base station".

The diploma project is presented on 47 pages, which include 37 illustrations, 3 tables, 5 drawings, 12 references and has 6 appendices.

The aim of the diploma project is to develop a base station (BS) which is a part of unmanned aerial system (UAS) and provides an increase to the effective radius of radio control of the unmanned aerial vehicle (UAV) using a remote control (RC) and improve overall stability of communication between UAV and RC by retransmitting radio signals between the elements of the UAS.

This device allows you to increase the effective control radius of the UAV up to 20 km within the line of sight from the location point of the BS, depending on weather conditions and surroundings.

Keywords: unmanned aerial vehicle, unmanned aerial system, base station, microcontroller, remote control, retransmission of radio signals, digital signal processing.

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Безпілотний авіаційний комплекс. Базова ста-
нція зв'язку»

Київ — 2022 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	2
Вступ.....	4
1 Огляд аналогів	5
2 Аналіз технічного завдання	9
2.1 Призначення та об'єкти встановлення пристрою.....	9
2.2 Умови експлуатації пристрою	10
2.3 Децимальний номер пристрою за ЄСКД.....	10
2.4 Розробка схеми електричної структурної.....	11
3 Розробка електронного модуля	13
3.1 Розробка схеми електричної принципової	13
3.1.1 Вузол обчислювальний	13
3.1.2 Вузол приймально-передавальний.....	17
3.2 Обґрунтування конструкції електронного модуля	23
3.2.1 Обґрунтування конструкції друкованої плати.....	23
3.2.2 Обґрунтування вибору виробника ДП.....	25
3.2.3 Обґрунтування вибору матеріалів друкованої плати	25
3.2.4 Обґрунтування вибору електронних компонентів	26
3.3 Проектування друкованої плати.....	31
3.4 Результати розробки електронного модуля	33
3.4.1 Початковий варіант ЕМ.....	33
3.4.2 Кінцевий варіант ЕМ	35

					PI81.464461.001 ПЗ				
ЗМ.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	Безпілотний авіаційний комплекс. Базова станція зв'язку	Літ.	Лист	Листів	
Розробив	Євдокімов Д.								
Перевірів	Адаменко В.						1		
						PI-81, РТФ			
Н. Контр.	Адаменко В.								
Затвер-	Адаменко В.								

4 Розробка корпусу пристрою	37
4.1 Обґрунтування конструкції корпусу	37
4.2 Обґрунтування вибору матеріалу корпусу	37
4.3 Розробка тривимірної моделі корпусу	38
4.4 Результати розробки корпусу пристрою	41
5 Результати розробки пристрою	42
Висновки	44
Перелік джерел посилання	46
Додаток А. Технічне завдання	0
Додаток Б. Розрахунки мінімальної площі ДП	6
Додаток В. Розрахунок ширини провідників та зазору між ними	7
Додаток Г. Перелік елементів	12
Додаток Д. Специфікація на пристрій	16
Додаток Є. Специфікація на друкований вузол	17

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						2
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ТЗ — технічне завдання;
БАК — безпілотний авіаційний комплекс;
БЛА — безпілотний літальний апарат;
БСЗ — базова станція зв'язку;
ПДК — пульт дистанційного керування;
ЄСКД — єдина система конструкторської документації;
ЦОС — цифрова обробка сигналів;
ЕМ — електронний модуль;
ДП — друкована плата;
БДП — багатошарова друкована плата;
ІМС — інтегральна мікросхема;
МК — мікроконтролер;
ПЗ — програмне забезпечення;
ФНЧ — фільтр нижніх частот;
ПММА — поліметилметакрилат;
GFSK — Гаусівська частотна маніпуляція;
2GFSK — двохпозиційна Гаусівська частотна маніпуляція;
GMSK — Гаусівська частотна маніпуляція з мінімальним частотним зсу-
вом;
QPSK DSSS — квадратурно-фазова маніпуляція з розширенням спектру
методом прямої послідовності;
USB — *Universal Serial Bus*;
UART — *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*;
SWD — *Serial Wire Debug*;
JTAG — *Joint Test Action Group* (інтерфейс);
EEPROM — *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*;
SPI — *Serial Peripheral Interface*.

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						3
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

З кожним роком застосування безпілотних літальних апаратів (БЛА) набуває все більших масштабів, а сам розвиток БЛА тісно пов'язаний саме з програмними реалізаціями нових підходів у цифровій обробці сигналів (ЦОС), алгоритмах автономного/напіваавтономного керування та спільним розвитком програмної та апаратної архітектури системи керування безпілотними авіаційними комплексами (БАК).

Враховуючи вище згадане, стає зрозуміло, що організація якісного зв'язку між компонентами БАК та, як наслідок, продумана інфраструктура забезпечення цього зв'язку є критичними елементами при розробці та експлуатації будь-якого сучасного БАК.

Даний дипломний проект являє собою частину БАК, до задач якого належить оптична розвідка та спостереження за рухомими об'єктами за межами прямої видимості з позиції оператора. Ефективний радіус керування БАК задано на рівні 10 км при використанні пульта дистанційного керування (ПДК), з можливістю збільшення за рахунок додавання проміжного радіовузла.

Основною метою дипломного проекту є створення компактної і дешевої БСЗ, яка матиме у своєму складі радіомодуль приймально-передавальний та простий і технологічний у виробництві корпус. БСЗ виконуватиме роль проміжного ретрансляційного радіовузла між ПДК та БЛА для збільшення ефективного радіусу керування БЛА до 20 км.

В основу розробки закладаються принципи відкритої архітектури, зворотної сумісності та використання стандартизованих шин і протоколів передачі даних, що дозволить у майбутньому спростити можливу інтеграцію додаткових компонентів БСЗ і забезпечить модульність конструкції БСЗ та вбудованого програмного забезпечення.

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						4
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД АНАЛОГІВ

На ринку присутня велика кількість радіомодулів з необхідними робочими частотами, проте знайти прийнятно-передавальні модулі з необхідними електричними параметрами, габаритними розмірами та форм-фактором практично неможливо. Також у даних рішень відсутня можливість зміни протоколів обміну даними через радіоканал, що робить неможливим реалізацію заданих функцій пристрою.

Таким чином було прийнято рішення про створення власного схематехнічного рішення, що задовольнятиме умовам технічного завдання, яке наведено у додатку А.

Більшість аналогів даного пристрою мають лише частину необхідного технічного рішення, тому оглядаються не повні аналоги, а лише максимально наближені по функціональним особливостям.

Було розглянуто 3 найбільш схожих та популярних рішення на ринку:

1) Модуль *RF2401Pro* [1] — даний прийнятно-передавальний модуль має малі розміри ($13 \times 23 \times 3$ мм), невеликий споживаний струм (до 14 мА), малу напругу живлення (1,9 – 3,6 В) та широкий діапазон температур експлуатації ($-40 - 85$ °С). Проте вихідна потужність модулю становить лише 0 dBm (1 мВт), що недостатньо для забезпечення стійкого зв'язку навіть на рівні найгірших рішень для існуючих комплексів БЛА (орієнтовна максимальна дальність становить 100-300 м прямої видимості за повної відсутності завад або перешкод. Також у даного модуля відсутні роз'єми для підключення зовнішніх антен, що не дозволяє збільшити дальність зв'язку за допомогою кращої антени. Керування та обмін даними між іншими пристроями та модулем відбувається через інтерфейс SPI.

Основними перевагами цього рішення є малі ціна та габарити.

Його зображення представлено на рисунку 1.1.

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						5
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

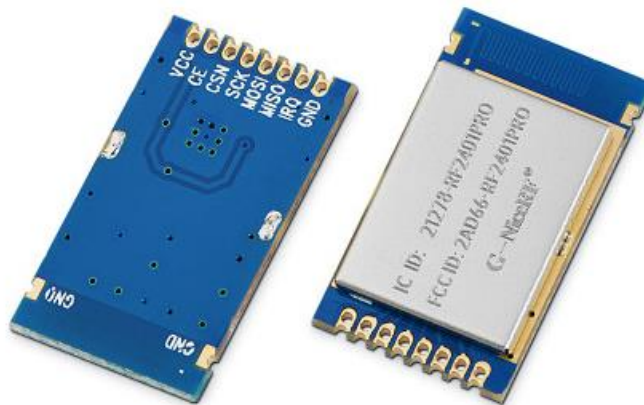


Рисунок 1.1 — RF2401Pro [1]

2) Модуль E01-2G4M27D [2] — порівняно з попереднім даний модуль має більші габарити (18 x 33,4 x 12,8 мм), значно більший струм споживання (500 мА при живленні напругою 3,3 В або 400 мА при живленні напругою 5 В), що обумовлено збільшеною вихідною потужністю, яка становить 27 дБм (500 мВт). Ефективна дальність зв'язку даного модуля становить 5 км. Для керування модулем та обміном даних між ним та периферійними пристроями використовується інтерфейс *SPI*, як і у попередньому варіанті. Також у даному рішенні використано підсилювач радіосигналу для збільшення вихідної потужності до 500 мВт, оскільки потужність радіомодулю без підсилювача становить 1 мВт. Радіомодуль оснащений роз'ємом типу *SMA-K*, що дозволяє підключити до нього типові антени типу монополь або диполь.

Перевагами даного радіомодулю порівняно з попереднім є наявність роз'єму для антени та висока вихідна потужність, що забезпечує значно більшу дальність зв'язку у прямій видимості.

Недоліком є достатньо великий споживаний струм, що обмежує використання модуля в енергозалежних системах, проте в ньому передбачений режим сну, який дозволяє знизити струм споживання до

Зображення модуля представлено на рисунку 1.2.

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						6
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.2 — E01-2G4M27D [2]

3) *CC1352P* [3] — розглянутий модуль має схожі параметри до першого варіанту, проте його габаритні розміри: 20 x 32 x 4 мм, потужність 5 дБм (3,2 мВт) з ефективною дальністю зв'язку 120 м, та максимальною приблизно 400-500 м у прямій видимості за ясної погоди, в умовах відсутності завад та фізичних перешкод. Даний модуль є дводіапазонним, з можливістю перемикавання на субгігагерцовий діапазон, що збільшує ефективну дальність зв'язку до 1,5 км, а максимальну — приблизно до 3 км в ідеальних умовах. Також електронний модуль оснащений виходами для підключення периферійних пристроїв, чого не було в попередніх рішеннях. Це зручно для створення закінчених пристроїв на основі даного модулю. Для обробки інформації та комунікації радіомодуля з периферією використовується мікроконтролер на базі ядра *Cortex-M4F*, який забезпечує високошвидкісну обробку сигналів та керування підключеними до електронного модуля. Також модуль оснащений роз'ємом *U.FL*, який дозволяє підключити його до іншого модулю, підсилювачу або провідної антени.

Перевагами даного рішення порівняно з іншими є наявність додаткових входів та виходів для підключення периферійних пристроїв, а також наявністю роз'єму для антени, чого не було у першого модулю і не дозволяло його використати у якості радіомодуля БСЗ.

Основні недоліки полягають в тому, що даний модуль має розміри як і у другого рішення, проте його потужність дуже мала, тому й відповідно мала

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						7
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

дальність зв'язку, яка не дозволяє забезпечити виконання вимог ТЗ по дальності зв'язку навіть на 10%, що є неприпустимим.

Зображення даного модуля представлено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 — CC1352P [3]

В результаті огляду аналогів було виявлено, що пристрої, які знаходяться у вільному продажі, не відповідають умовам технічного завдання майже по всім параметрам, тому доцільно розробити власне схемотехнічне та конструкторське рішення, яке забезпечить необхідні функції, електричні та геометричні параметри кінцевого пристрою.

Проаналізувавши технічні характеристики та конструкторські рішення оглянутих аналогів можна виявити найбільш оптимальні рішення та на їх основі розробити пристрій з кращими функціональними та технічними властивостями, уникаючи при цьому недоліків вже існуючих пристроїв.

Зокрема розробка власного рішення дозволяє використовувати необхідні протоколи передачі даних, оскільки покупні модулі зазвичай не мають можливості змінювати програмне вбудоване програмне забезпечення.

Тому розробка власної конструкції є найбільш оптимальним рішенням, особливо для врахування подальшого монтажу електронного модуля у корпус власної розробки, що має бути розрахований на використання у складі БАК, з відповідними особливостями конструкції, на яку монтується БСЗ для забезпечення необхідних функціональних обов'язків даного пристрою.

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						8
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

2.1 Призначення та об'єкти встановлення пристрою

Унаслідок аналізу технічного завдання (додаток А), було визначено, що базова станція зв'язку (БСЗ), надалі пристрій, повинна мати в своєму складі два основні компоненти:

- радіомодуль приймально-передавальний;
- корпус пристрою.

Радіомодуль приймально-передавальний, надалі електронний модуль (ЕМ), призначений для використання у складі базової станції зв'язку (БСЗ) в якості головного вузла.

Основна функція БСЗ полягає в організації стійкого радіозв'язку між безпілотним літальним апаратом (БЛА) та пультом дистанційного керування (ПДК) зі складу безпілотного авіаційного комплексу (БАК) на відстанях, що перевищують ефективну відстань керування при використанні виключно ПДК, тобто на відстанях більше 10 км.

Дальність стійкого зв'язку між елементами БАК залежно від погодних умов та навколишнього середовища має становити:

- до 10 км між БСЗ та ПДК;
- до 20 км між БСЗ та БЛА.

Для прошивання мікроконтролерів, а також читання та запису даних до постійної пам'яті пристрою типу *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM)* передбачається використання 10-вивідного друкованого роз'єму типу *Serial Wire Debug (SWD)* з можливістю його використання у якості роз'єму для інтерфейсу типу *Joint Test Action Group (JTAG)*.

Для обміну інформацією з периферійними пристроями використовуватимуться наступні варіанти підключень:

- універсальна послідовна шина стандарту *Universal Serial Bus (USB)*

2.0 Type-B Micro;

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						9
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

- послідовна шина з підтримкою протоколу *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)*;
- чотири аналогові входи з аналого-цифровим перетворенням (АЦП);
- один цифровий вихід з цифро-аналоговим перетворенням (ЦАП).

Для забезпечення живлення пристрою постійним струмом 9 В / 2 А передбачаються наступні варіанти забезпечення живлення:

- подача живлення через універсальну послідовну шину стандарту *USB 2.0 Type-B Micro*;
- подача живлення через виділений стандартний 2-вивідний роз'єм.

Пристрій призначено для розміщення усередині сторонніх пристроїв, які здатні забезпечити його захист від потрапляння надмірної вологи та пилу.

Об'єктами встановлення даного пристрою може виступати будь-яка стаціонарна техніка та пристрої, умови експлуатації якої відповідають умовам експлуатації за ГОСТ 15150-69 УХЛ-2.1 [4] і ГОСТ 16019-2001 С2 [5].

2.2 Умови експлуатації пристрою

Кліматичне виконання за ГОСТ 15150-69 УХЛ-2.1 [4].

УХЛ — помірний та холодний макрокліматичні райони.

2 — експлуатація під навісом (захист від вертикальних струменів води, допускається оббризування, потрапляння пилу та снігу)

2.1 — робота всередині комплектуючих пристроїв категорія розміщення до 2 включно, де виключається конденсація вологи.

Умови експлуатації згідно ГОСТ 16019-2001 С2 [5].

С2 — стаціонарна, встановлюється під навісом на відкритому повітрі або в неопалюваних наземних і підземних спорудах.

2.3 Децимальний номер пристрою за ЄСКД

Децимальний номер обрано згідно класифікатора ЄСКД [6].

- 46 — Прилади радіоелектронного управління, зв'язку, навігації й обчислювальної техніки;

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						10
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

- 464 — Радіо приймально-передавальні;
- 4644 — Приймально-передавальні, прямої видимості, тропосферні;
- 46446 — Тропосферні ретрансляційні багатоканальні;
- 464461 — Стационарні, з діапазоном частот від 300 МГц до 3 ГГц включно.

Отриманий децимальний номер електронного модуля — 464461.

2.4 Розробка схеми електричної структурної

До складу БАК входять наступні елементи:

- Безпілотний літальний апарат, який здійснює фото та відеозйомку;
- Пульт дистанційного керування, за допомогою якого здійснюється керування БЛА та отримання відеосигналу;
- Базова станція зв'язку, яка виступає в ролі ретранслятора радіосигналу керування від ПДК до БЛА та забезпечує позиціонування БЛА у просторі при здійсненні автоматичної посадки за відсутності сигналу системи супутникової навігації.

Структурна схема БАК наведена на рисунку 2.1.

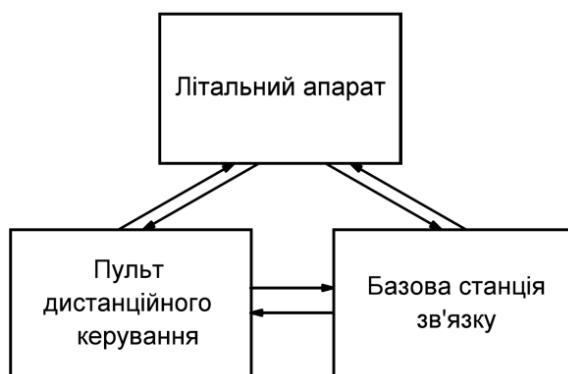


Рисунок 2.1 — Структурна схема БАК

Внаслідок аналізу ТЗ на БАК і огляду технічних рішень аналогів, з метою планування етапів розробки пристрою було створено схему електричну структурну БСЗ (рис. 2.2), яка зображує основні функціональні вузли пристрою.

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						11
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

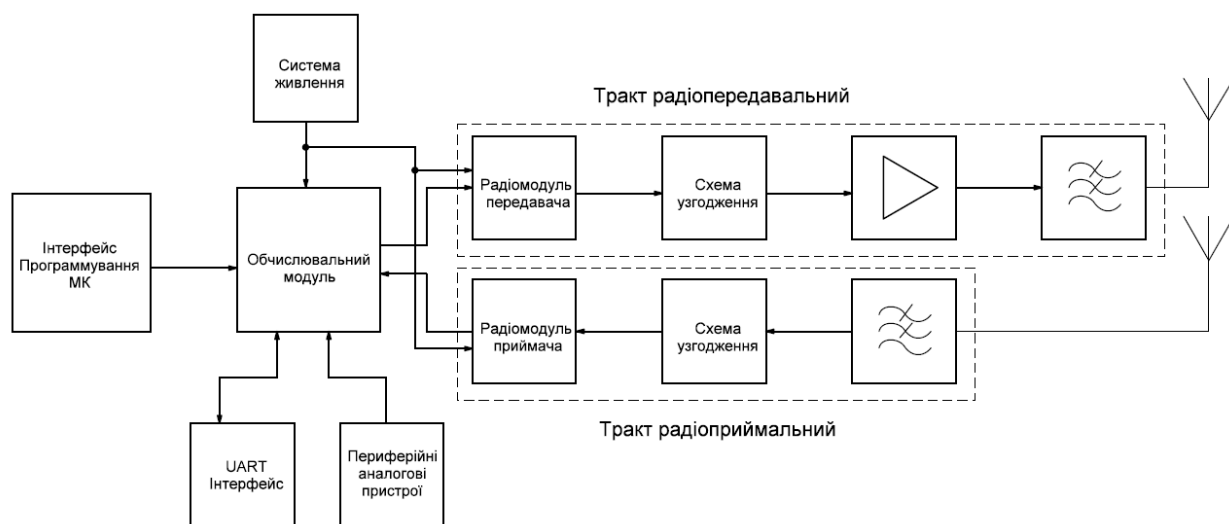


Рисунок 2.2 — Схема електрична структурна ЕМ у складі БСЗ

ЕМ у складі БСЗ можна поділити на два функціональні вузли:

- вузол обчислювальний, до складу якого відносяться обчислювальний модуль, інтерфейс програмування МК, систему живлення, UART інтерфейс і периферійні аналогові пристрої;
- вузол приймально-передавальний, до складу якого входять радіоприймальний та радіопередавальний тракти.

3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ

3.1 Розробка схеми електричної принципової

3.1.1 Вузол обчислювальний

В основі електронного модуля лежить обчислювальний вузол з мікроконтролером (МК) DD2, який представлено інтегральною мікросхемою (ІМС) *NXP LPC1549JBD48QL* на базі архітектури *ARM Cortex-M3* у вивідному корпусі формату *LQFP-48*.

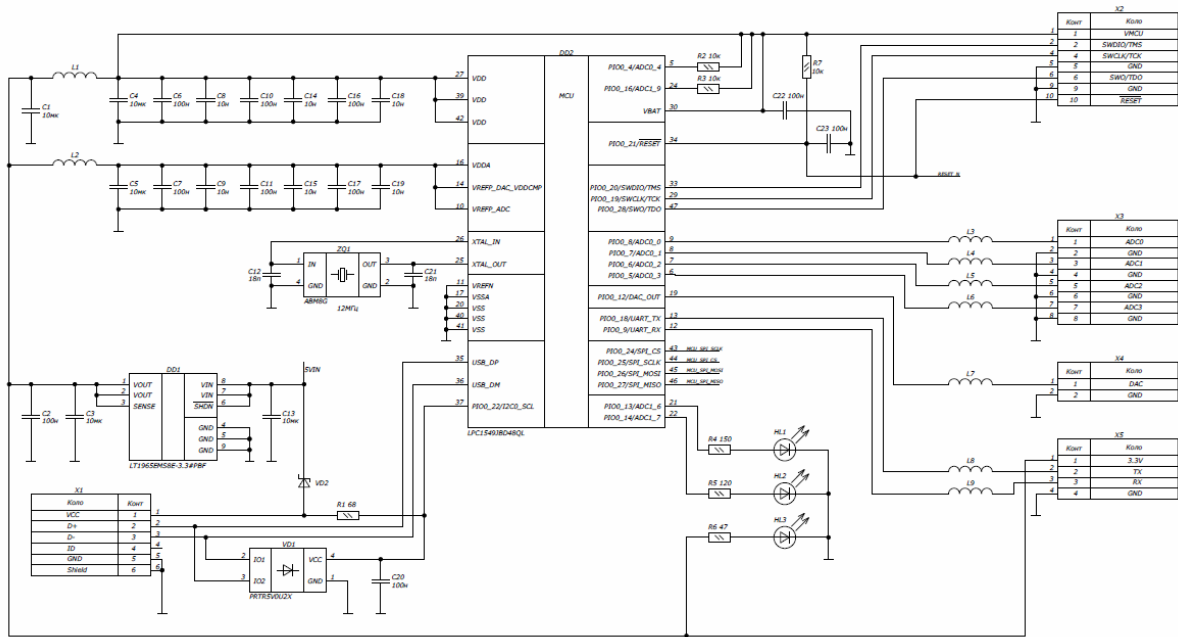


Рисунок 3.1 — Загальний вигляд схеми електричної принципової обчислювального вузла ЕМ

DD2 виступає головним вузлом для всіх інших елементів електронного модуля відповідно до моделі взаємодії «*master-slave*» та забезпечує керування пристроєм і початкову обробку вхідної/вихідної інформації з підключених периферійних пристроїв для сигнальних процесорів DD4–DD5 *Silicon Labs EFR32MG24B020F1536IM40-B*.

Підключення МК DD2 та сигнальних процесорів DD4–DD5 реалізовано за допомогою інтерфейсу *Serial Peripheral Interface (SPI)*

Кварцовий резонатор ZQ1 номіналом 12 МГц використовується для задання тактової частоти МК DD2 і має навантажувальні конденсатори C12, C21

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI81.464461.001 ПЗ

Лис
13

для забезпечення стабільного старту кварцового резонатора на частоті першої гармоніки.

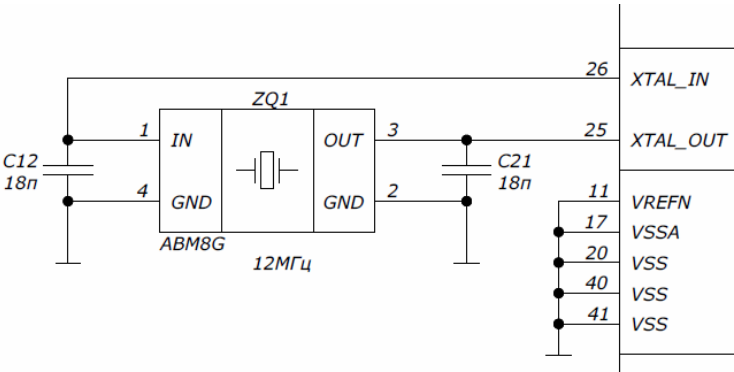


Рисунок 3.2 — Зображення принципової схеми підключення кварцового резонатора ZQ1 до МК DD2

ІМС DD1 разом з паралельно підключеними фільтруючими конденсаторами C2, C3, C13 забезпечує подачу живлення для обчислювального вузла с постійною напругою 3,3 В.

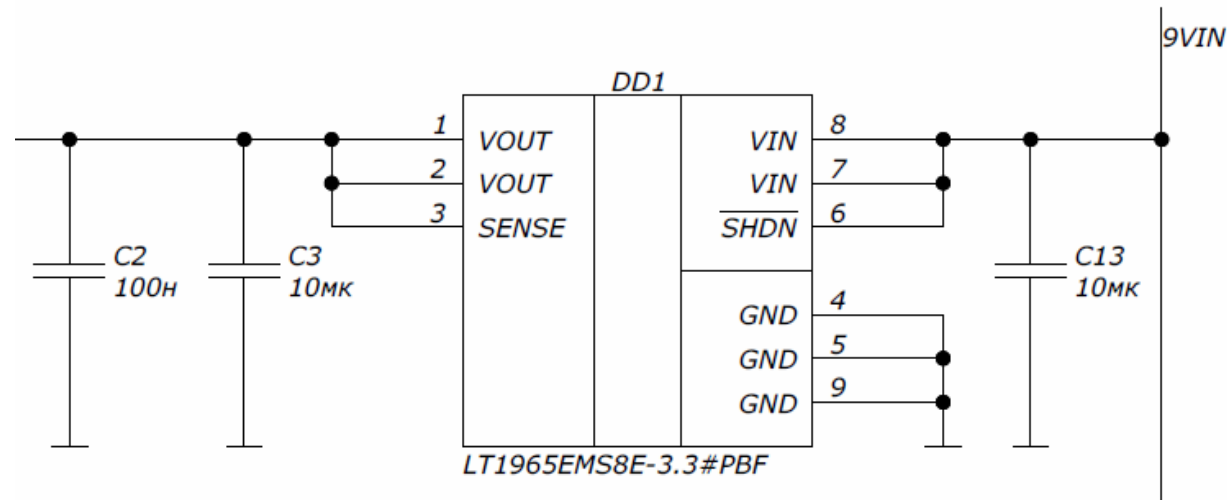


Рисунок 3.3 — Зображення принципової схеми підключення DD1 та фільтруючих конденсаторів

Для зменшення впливу шумів з цифрових кіл на аналогові кола, МК DD2 має окремі кола фільтрації для цифрового та аналогового живлення.

Схема фільтрації живлення цифрових кіл складається з паралельно з’єднаних конденсатора C1, феритового фільтра L1 та конденсаторів C4, C6, C8, C10, C14, C16, C18, які відповідно до схеми електричної принципової

PI81.464461.001 E3 підключаються до виводів 27, 39, 42 МК DD2 та опціонально заземлюються на полігон цифрової землі.

Схема фільтрації живлення аналогових кіл МК DD2 складається з феритового фільтра L2 та паралельно з'єднаних конденсаторів C5, C7, C9, C11, C15, C17, C19, які відповідно до схеми електричної принципової PI81.464461.001 E3 підключаються до виводів 10, 14, 16 МК DD2 та опціонально заземлюються на полігон аналогової землі.

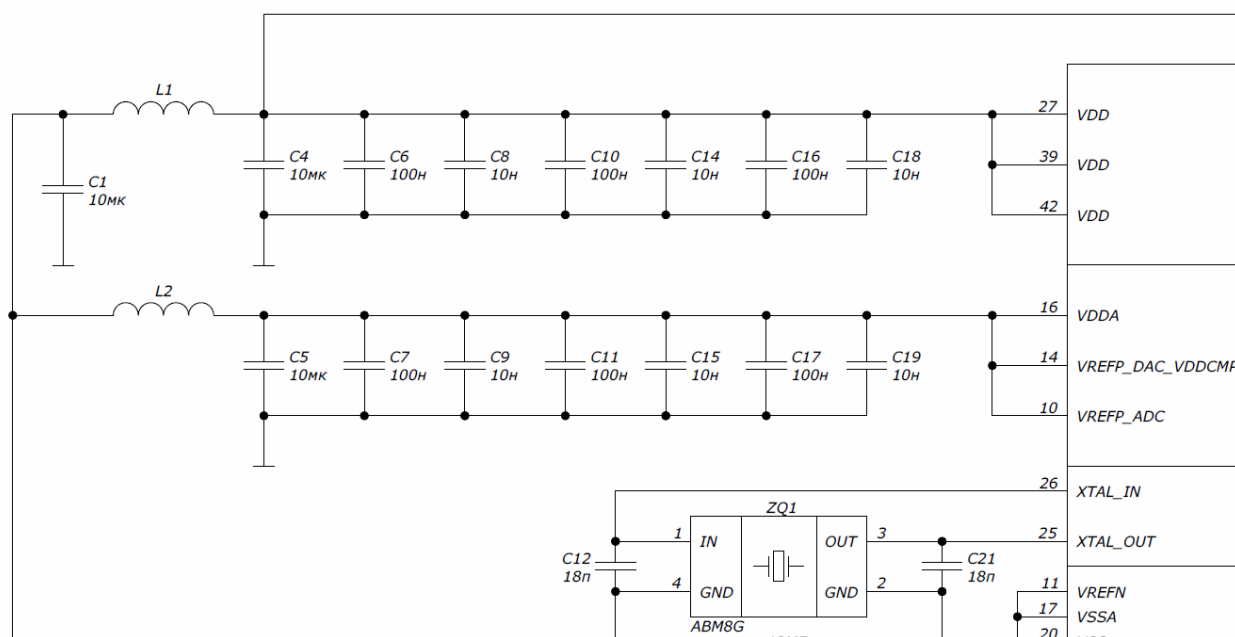


Рисунок 3.4 — Зображення принципової схеми фільтрації живлення цифрових та аналогових кіл МК DD2

Засоби зовнішньої індикації представлені світлодіодами HL1–HL3:

- HL1 — індикація наявності процесу прошивання DD2 (червоний колір);
- HL2 — індикація наявності процесу прийому/передачі інформації (синій колір);
- HL3 — індикація наявності живлення, запалюється, як тільки з'являється живлення на ІМС DD1 (зелений колір).

За потреби, індикація світлодіодів HL1–HL2 може бути вимкнута на програмному рівні через МК DD2.

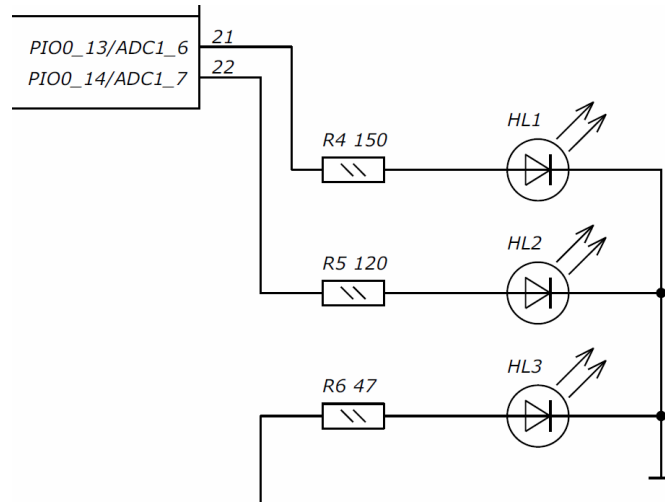


Рисунок 3.5 — Зображення принципової схеми підключення світлодіодів HL1–HL3

З метою забезпечення можливості підключення пристрою до сторонніх периферійних вузлів до його складу входять роз'єми X1–X5:

— X1 — універсальна послідовна шина стандарту *USB 2.0* формату *Type-B Micro*, яка може використовуватися одночасно для подачі напруги живлення (9 В / 2 А) та для обміну даними з периферійними пристроями (наприклад персональний комп'ютер), які підтримують стандарт *USB 2.0*;

— X2 — друкований 10-вивідний роз'єм типу *SWD*, який служить для прошивання і забезпечення можливості примусового перезапуску ІМС DD2, DD4, DD5, а також може бути використаний, як роз'єм інтерфейсу типу *Joint Test Action Group (JTAG)*;

— X3 — 8-вивідний роз'єм з чотирма аналоговими входами АЦП, який, за потреби, може використовуватися для підключення периферійних аналогових пристроїв;

— X4 — 2-вивідний роз'єм з одним аналоговим виходом ЦАП, який, за потреби, може використовуватися для керування периферійними аналоговими пристроями;

— X5 — 4-вивідний роз'єм, який, за потреби, використовується для обміну даними та організації зв'язку з цифровими пристроями за допомогою протоколу UART.

Феритові фільтри L3–L10 встановлюються на сигнальних та силових лініях роз'ємів X3–X6, для попередження потрапляння високочастотних шумів з роз'ємів на провідники ДП.

TVS-діод VD1 встановлений на сигнальних лініях роз'єму X1 і виконує функцію захисту чутливих сигнальних ліній від імпульсних сплесків і перенавантаження з високим ступенем швидкодії.

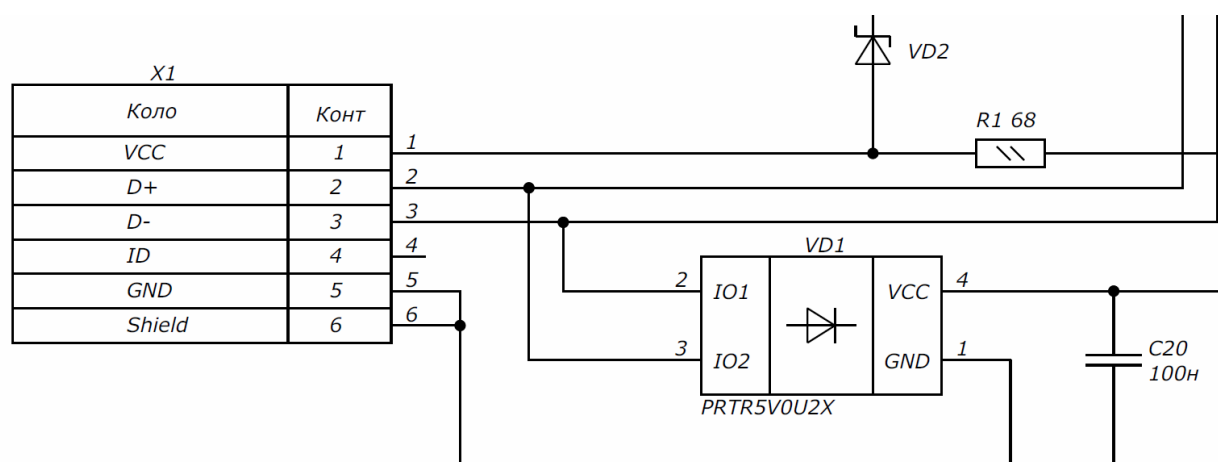


Рисунок 3.6 — Зображення принципової схеми підключення TVS-діоду VD1

3.1.2 Вузол приймально-передавальний

Для цифрової обробки сигналів (ЦОС), прийому та передачі інформації у складі пристрою використовуються сигнальні процесори DD4–DD5, по одному на радіоприймальний та радіопередавальний тракти.

DD4–DD5 представлені IMC *Silicon Labs EFR32MG24B020F1536IM40-B*, яка поєднує в одному безвивідному корпусі формату *VFQFN-40* два пристрої:

- готовий приймально-передавальний пристрій з діапазоном робочих частот 2,4– 2,485 ГГц;
- МК з ядром на базі архітектури *ARM Cortex-M33* для ЦОС і обробки команд зі сторони МК DD2.

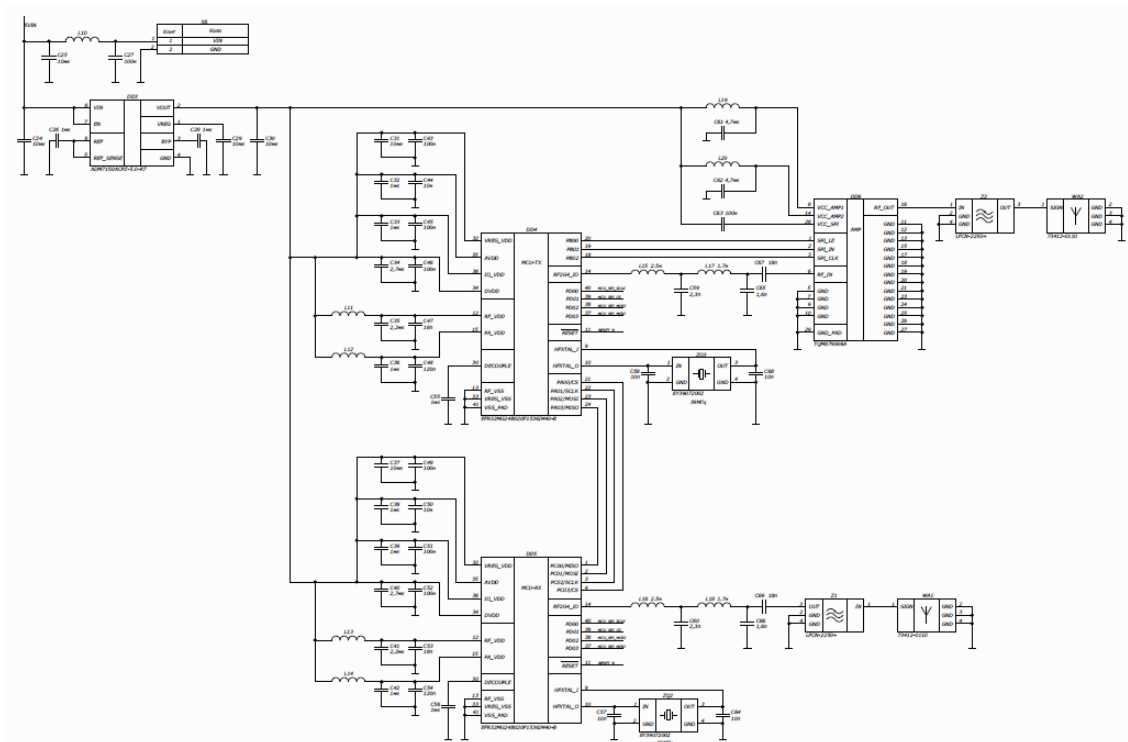


Рисунок 3.7 — Загальний вид схеми електричної принципової приймально-передавального вузла ЕМ

Основною вимогою до виготовлення приймально-передавального вузла є стабільний імпеданс провідникових ліній у складі радіоприймального та радіопередавального трактів на рівні 50 Ом для узгодження хвильових опорів антени та лінії передачі, що необхідно для забезпечення режиму біжучих хвиль та стабільної роботи приймально-передавального вузла з мінімальними втратами енергії.

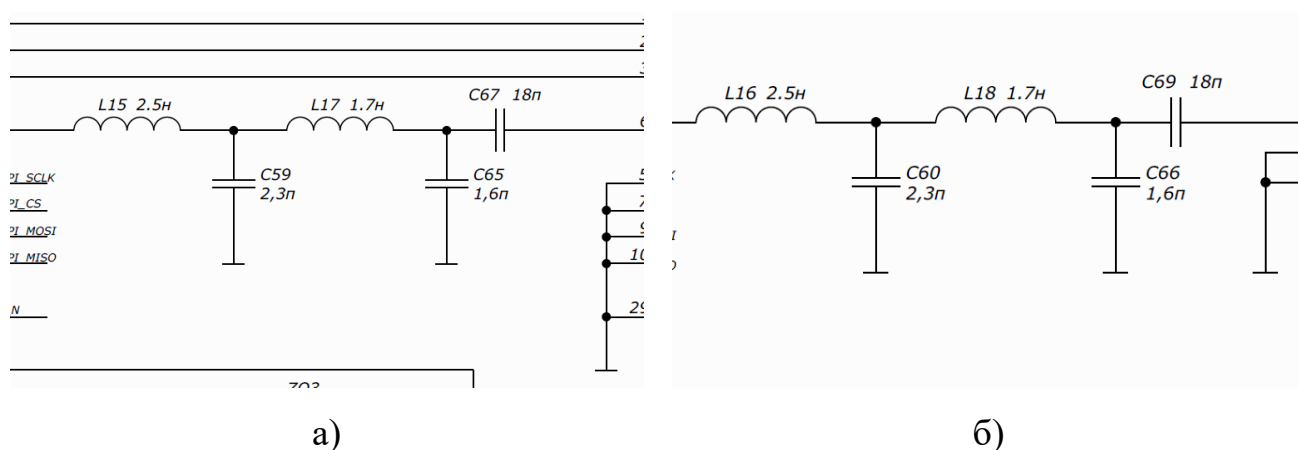


Рисунок 3.8 — Зображення принципової схеми підключення узгоджувального кола між DD4 і DD6 (а) та між DD5 і Z1 (б)

ІМС DD3 разом з необхідною обв'язкою у складі фільтруючих конденсаторів та феритового фільтру забезпечує стабільне живлення приймально-передавального вузла с постійною напругою 5 В і максимальним струмом 0,8 А.

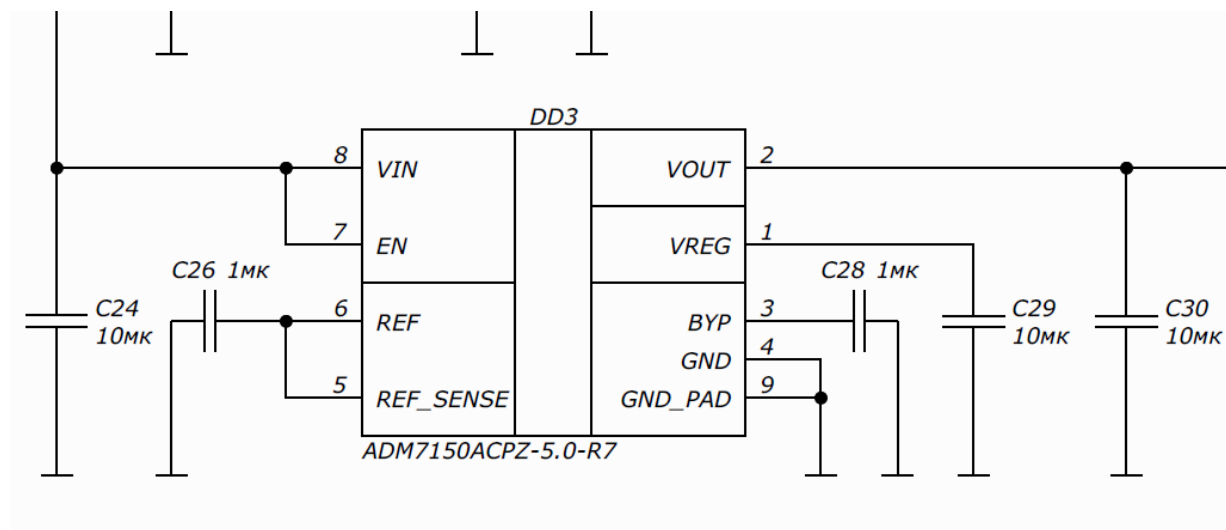


Рисунок 3.9 — Зображення принципової схеми підключення DD3 та фільтруючих конденсаторів

Роз'єм Х6 це 2-вивідний роз'єм виконаний у пластиковому корпусі, який використовується виключно для живлення радіомодуля з входною напругою на рівні 9 В і максимальним входним струмом до 2 А.

Фільтри Z1–Z2 являють собою радіочастотні фільтри нижніх частот (ФНЧ) з частотою зрізу на рівні 2575 МГц і виконують функцію фільтрації радіоприймального та радіопередавального трактів від високочастотних шумів та завад.

Для зменшення впливу шумів з цифрових кіл на аналогові кола, ІМС DD4–DD5 мають окремі кола фільтрації для цифрового та аналогового живлення.

Схема фільтрації живлення цифрових кіл DD4 складається з паралельно з'єднаних конденсаторів C31, C43, C33, C45 C34, C46, які відповідно до схеми електричної принципової PI81.464461.001 Е3 підключаються до виводів 32, 34, 36 сигнального процесора DD4 та опціонально заземлюються на полігон цифрової землі.

Схема фільтрації живлення аналогових кіл DD4 складається з паралельно з'єднаних конденсаторів C32, C44, феритового фільтра L11, конденсаторів C35, C47, феритового фільтра L12, конденсаторів C36, C48, які відповідно до схеми електричної принципової PI81.464461.001 E3 підключаються до виводів 12, 15, 35 сигнального процесора DD4 та опціонально заземлюються на полігон цифрової землі.

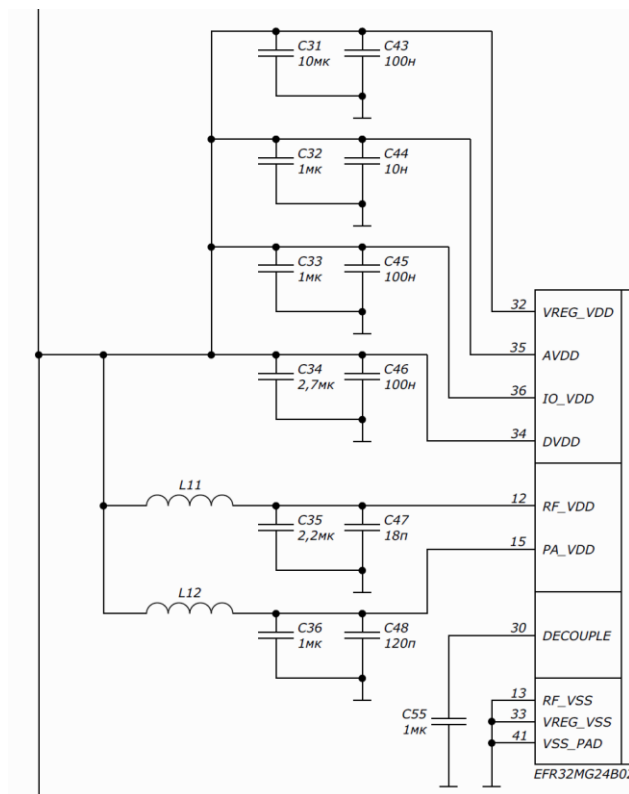


Рисунок 3.10 — Зображення принципової схеми підключення кіл аналогового та цифрового живлення до сигнального процесора DD4

Схема фільтрації живлення цифрових кіл DD5 складається з паралельно з'єднаних конденсаторів C37, C49, C39, C51 C40, C52, які відповідно до схеми електричної принципової PI81.464461.001 E3 підключаються до виводів 32, 34, 36 сигнального процесора DD5 та опціонально заземлюються на полігон цифрової землі.

Схема фільтрації живлення аналогових кіл DD5 складається з паралельно з'єднаних конденсаторів C38, C50, феритового фільтра L13, конденсаторів C41, C53, феритового фільтра L14, конденсаторів C42, C54, які відповідно до

схеми електричної принципової PI81.464461.001 E3 підключаються до виводів 12, 15, 35 сигнального процесора DD5 та опціонально заземлюються на полігон цифрової землі.

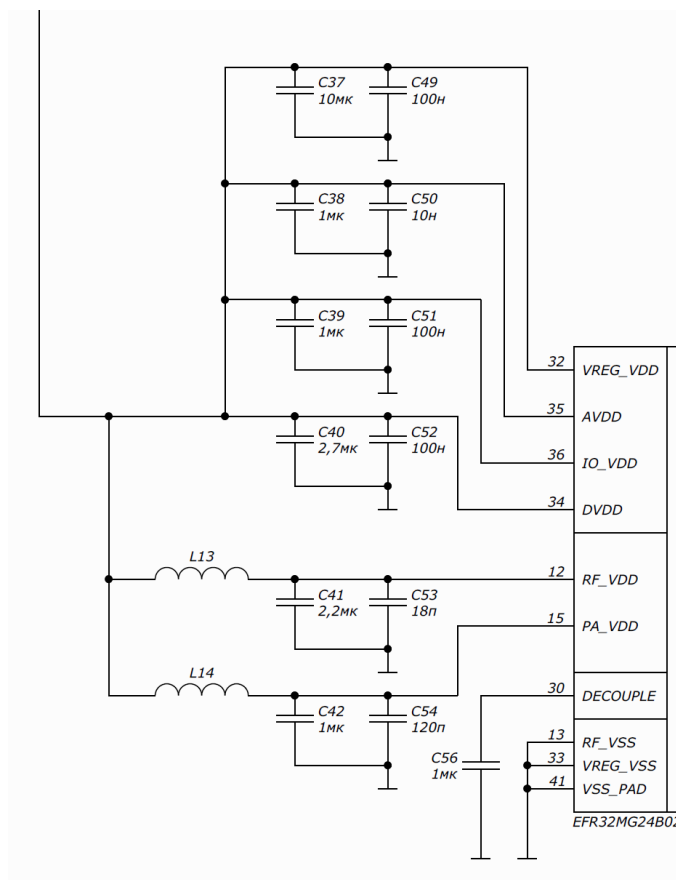


Рисунок 3.11 — Зображення принципової схеми підключення кіл аналогового та цифрового живлення до сигнального процесора DD4

Антенні коаксіальні роз'єми WA1–WA2 можуть розраховані на використання антен як монопольного, так і направленої типів, з коаксіальним роз'ємом підключення, робочими частотами від 2 до 6 ГГц і хвильовим опором 50 Ом.

Цифровий підсилювач зі змінним коефіцієнтом підсилення DD6, представлений ІМС Qorvo TQM879006A у корпусі формату VFQFN-28 структурно складається з двох підсилювачів та одного цифрового атенюатора, який керується за допомогою трипровідного інтерфейсу SPI, що підключено до сигнального процесору DD4, що таким чином керує коефіцієнтом підсилення DD6.

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		21

DD6 призначений для підсилення радіосигналу, який надходить з сигнального процесору DD4, до 40 дБм включно з кроком 0,5 дБм.

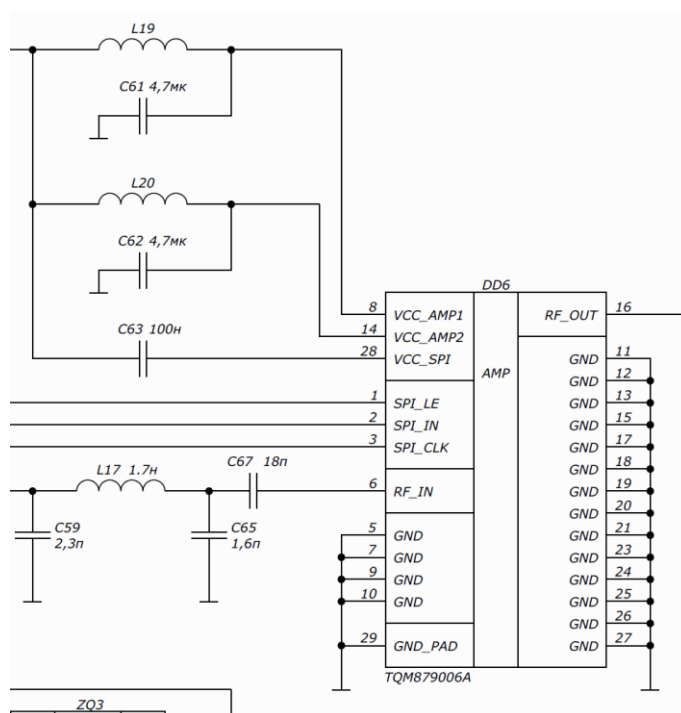
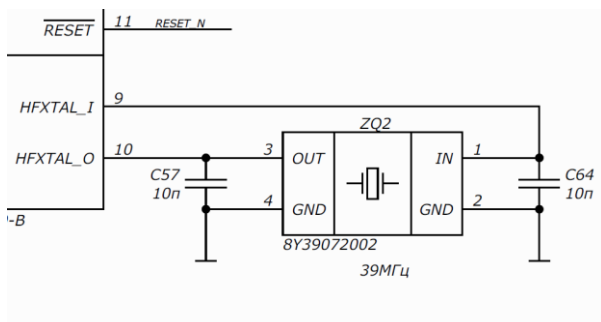
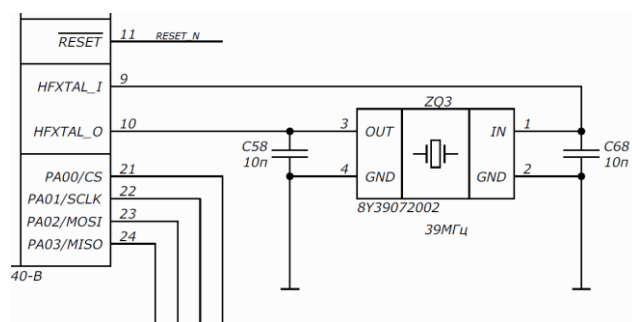


Рисунок 3.12 — Зображення принципової схеми підключення кіл живлення до цифрового підсилювача DD6

Кварцові резонатори ZQ2–ZQ3 номіналами по 39 МГц використовуються для задання тактової частоти сигнальних процесорів DD4–DD5 і мають підключені навантажувальні конденсатори C58, C68 і C57, C64 відповідно для забезпечення стабільного старту кварцових резонаторів на частоті першої гармоніки.



а)



б)

Рисунок 3.13 — Зображення принципової схеми підключення кварцового резонатора ZQ2 до DD5 (а) та ZQ3 до DD4 (б)

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI81.464461.001 ПЗ

Лис
22

3.2 Обґрунтування конструкції електронного модуля

3.2.1 Обґрунтування конструкції друкованої плати

Шар	Матеріал	Товщина
Верхня шовкографія		
Верхня захисна маска	Паяльна маска	0,0200
Верхній шар металізації	CF-004	0,0350
	PP-022	0,2083
Другий шар металізації	CF-004	0,0350
	FR-4 TG130	1,0650
Третій шар металізації	CF-004	0,0350
	PP-022	0,2083
Нижній шар металізації	CF-004	0,0350
Нижня захисна маска	Паяльна маска	0,0200
Нижня шовкографія		
Загальна номінальна товщина: 1,6616		

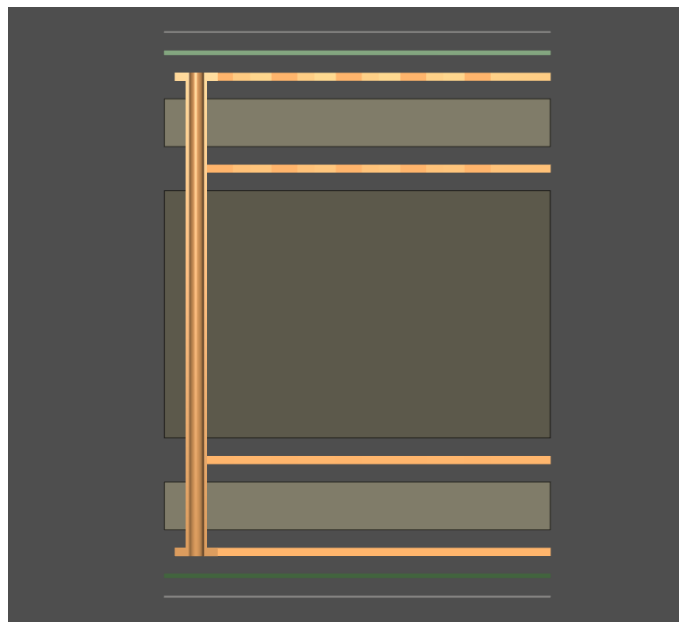
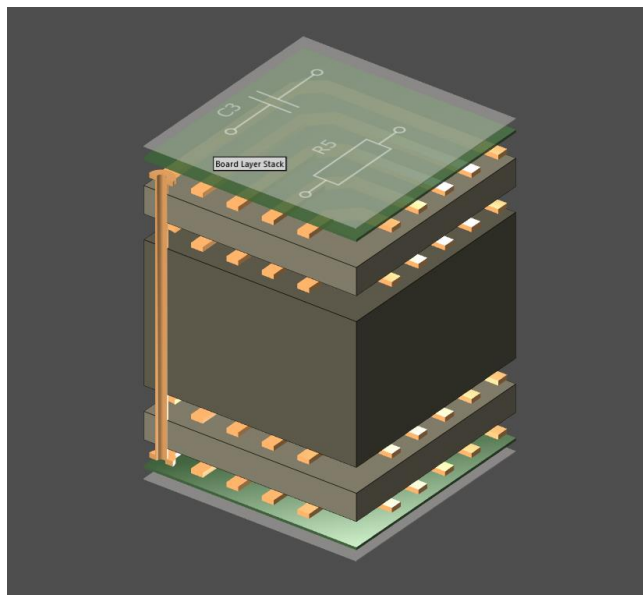
Рисунок 3.14 — Опис пошарової структури готової друкованої плати

Виходячи з того, що схема містить 120 електронних компонентів, а друкована плата (ДП) має бути відносно компактною для розміщення у корпусі мінімальних габаритів і мати порівняно низьку вартість виробництва та максимально короткий технологічний цикл, то оптимальним рішенням для зменшення габаритних розмірів ДП буде використання багатошарової технології методом металізації наскрізних отворів.

Оптимальна кількість шарів металізації визначається на рівні чотирьох із товщиною провідникового шару на рівні 35 мкм залежно від шару металізації.

Додатково, при виготовленні ДП мають враховуватись вимоги по імпедансу на рівні 50 Ом для провідників радіоприймального та радіопередавального трактів, що є необхідним для узгодження хвильових опорів антени та лінії передач.

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		23



а)

б)

Рисунок 3.15 — Графічне зображення пошарової структури готової друкованої плати. Ізометричний вид (а) і вид збоку (б).

Altium Designer

Розрахунок ширини провідників з контрольованим імпедансом проводиться за допомогою утиліти *Layer Stack Manager* в *Altium Designer*, результати розрахунку наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Розраховані значення мінімальної ширини друкованих провідників і мінімальний зазор між друкованими провідниками

Тип лінії	Напруга, В	Струм, А	Ширина провідника, мм		Зазор, мм
			У вузькому	У широкому	
Силова	9	2	2,86	2,86	0,13
Силова	5	0,8	1,15	1,15	
Силова	3,3	0,6	0,86	0,86	
Сигнальна	3,3	0,1	0,15	0,18	

Розрахунок ширини провідників з контрольованим імпедансом проводиться за допомогою утиліти *Layer Stack Manager* в *Altium Designer*, результати розрахунку наведено в таблиці 3.2.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI81.464461.001 ПЗ

Лис

24

Таблиця 3.2 — Розраховане значення ширини провідників з контрольованим імпедансом на рівні 50 Ом

Тип лінії	Ширина провідника, мм		Зазор, мм
	У вузькому	У широкому	
Сигнальна	0,34	0,34	0,13

3.2.2 Обґрунтування вибору виробника ДП

Враховуючи наведені особливості ДП, виробником друкованої плати електронного модуля обрано компанію *NextPCB*, оскільки їх виробничі можливості [7] дозволяють забезпечити виготовлення багатошарової друкованої плати (БДП) за допомогою багатошарової технології методом металізації наскрізних отворів з чотирма шарами металізації мідною фольгою марки CF-004, провідниками з контрольованим імпедансом на рівні 50 Ом, габаритними розмірами 100 × 70мм і загальною номінальною товщиною готової ДП 1,6 мм при збереженні збалансованої вартості в поєднанні з коротким технологічним циклом виробництва.

У таблиці 3.3 наведена приблизна вартість замовлення виробництва описаних ДП у компанії *NextPCB* станом на 12.06.2022.

Таблиця 3.3 — Вартість виготовлення ДП при замовленні виробництва в компанії *NextPCB* з доставкою в Україну станом на 12.06.2022

Кількість ДП	Строк виробництва (год)	Загальна вартість ДП (долл. США)	Вартість доставки (долл. США)	
			FedEx	China Post
10	48	46,56	26,98	10,56
50	120	75,23	38,76	30,67
100	120	102,3	50,55	54,79
200	120	163,63	79,61	103,04

3.2.3 Обґрунтування вибору матеріалів друкованої плати

У якості матеріалів ДП були обрані наступні матеріали:

— Діелектрична основа – діелектрик марки FR4 TG-130 на основі препрегу марки 7628;

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						25
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

- Препрег – PP-022 на основі препрегу марки 7628;
- Зовнішня металізація – мідна фольга марки CF-004;
- Внутрішня металізація – мідна фольга марки CF-004.

Опис діелектричних шарів ДП:

- Основа – фольгований склотекстоліт марки FR4 TG-130 з препрегу марки 7628 ($Dk = 4,8$) товщиною 1,065 мм та з двосторонньої металізацією мідною фольгою марки CF-004 з товщиною провідникового шару 35 мкм;
- Зовнішні діелектричні шари – фольгований препрег PP-022 ($Dk = 4,5$) товщиною 0,2083 мм та з односторонньої металізацією мідною фольгою марки CF-004 з товщиною провідникового шару 35 мкм.

Наведені матеріали мають гарні діелектричні/провідникові властивості при помірній ціні, є загальнодоступними та відпрацьованими в технологічних процесах виготовлення багатошарових друкованих плат (БДП).

3.2.4 Обґрунтування вибору електронних компонентів

Електронні компоненти, що використовуються у пристрої, обирались з міркувань загальнодоступності та досягнення необхідних технічних характеристик за мінімально можливих фінансових витрат.

Основні вимоги до електронних компонентів висувались відповідно до обраних інтегральних мікросхем DD1–DD6. Це зумовлено тим, що всі інші пасивні та активні електронні компоненти (конденсатори, резистори, котушки індуктивності, сигнальні та силові роз'єми, феритові фільтри та ін.) виступають у ролі обв'язки та підбираються відносно параметрів, можливостей, конфігурації виводів та рекомендованої обв'язки відповідно до офіційних інформаційних листів обраних ІМС.

DD1 — ІМС *LT1965EMS8E-3.3#PBF* від *Linear Technoligies* це лінійний стабілізатор напруги, який обрано для живлення МК DD2 і обчислювального

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						26
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

модулю в цілому, завдяки вихідній напрузі на рівні 3,3 В, максимальному вихідному струму на рівні 1,1 А, широкому діапазону входних напруг для стабілізації 1,8–20 В, низькому параметру падіння напруги (до 310 мВ при струмах до 1,1 А) та низькому рівню шумів.

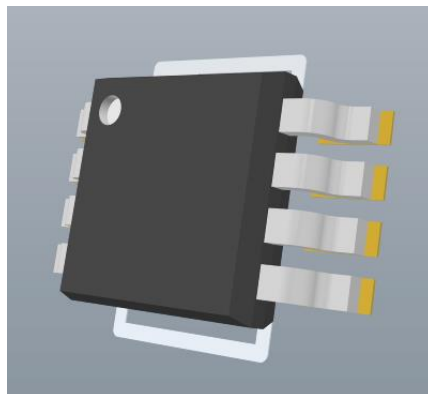


Рисунок 3.16 — 3D-модель IMC *LT1965EMS8E-3.3#PBF* від *Linear Technologies*

DD2 — IMC *LPC1549JBD48QL* від *NXP* обрано на роль головного керуючого процесора завдяки збалансованому поєднанню обчислювальної потужності, енергоефективності (робочий режим – 3,3 В/380 мА, режим простою – 3,3 В/15 мА) та побудові ядра мікроконтролера на базі архітектури *ARM Cortex-M3* від компанії *ARM*, що надає можливість використання широкої номенклатури засобів та інструментів розробки вбудованого програмного забезпечення (ПЗ) для платформи *ARM Cortex-M*.

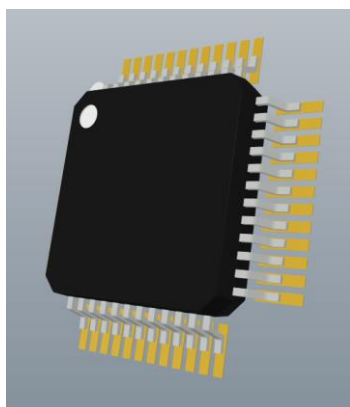


Рисунок 3.17 — 3D-модель IMC *LPC1549JBD48QL* від *NXP*

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						27
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

DD3 — ІМС *ADM7150ACPZ-5.0-R7* від *Analog Devices* це лінійний стабілізатор напруги, який обрано для живлення приймально-передавального вузла, за поєднання наступних характеристик:

- фіксована вихідна напруга 5 В;
- максимальний вихідний струм до 0,8 А;
- широкий діапазон входних напруг 6,3–16 В.
- безвивідний корпус формату *LFCSP-8* з плоскими контактними майданчиками, що сприяє зменшенню паразитної індуктивності від виводів;

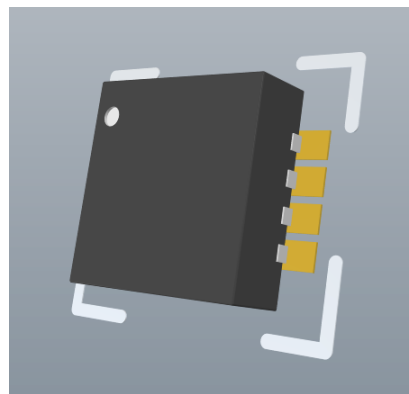


Рисунок 3.18 — 3D-модель ІМС *ADM7150ACPZ-5.0-R7* від *Analog Devices*

DD4, DD5 — ІМС *EFR32MG24B020F1536IM40-B* від *Silicon Labs* обрана на роль сигнального процесора завдяки наступним характеристикам:

- діапазон робочих частот 2,4–2,485 ГГц;
- можливість налаштування коефіцієнту підсилення вбудованого підсилювача передавача на 0/10/19,5 дБм;
- можливість роботи, як в режимі прийому, так і передачі інформації, що дозволяє використовувати однакові ІМС в радіоприймальному та радіопередавальному трактах радіомодуля;
- безвивідний корпус формату *VFQFN-40* з плоскими контактними майданчиками, що сприяє зменшенню паразитної індуктивності від виводів;

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						28
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

— низьке споживання струму в режимі прийому інформації на рівні (4,4 мА / 1 Мбіт/с).

До переваг *EFR32MG24B020F1536IM40-B* також належить апаратна і програмна підтримка великого асортименту доступних модуляцій:

- частотна маніпуляція (*FSK*);
- частотна маніпуляція з мінімальним частотним зсувом (*MSK*);
- Гаусівська частотна маніпуляція (*GFSK*);
- двохпозиційна Гаусівська частотна маніпуляція (*2GFSK*);
- Гаусівська частотна маніпуляція з мінімальним частотним зсувом (*GMSK*);
- квадратурно-фазова маніпуляція з розширенням спектру методом прямої послідовності (*QPSK DSSS*);

Побудова ядра мікроконтролера даного сигнального процесора на основі архітектури *ARM Cortex-M33* надає можливість використання широкої номенклатури засобів та інструментів розробки вбудованого ПЗ для платформи *ARM Cortex-M*.

Додатковою перевагою сигнальних процесорів серії *EFR32 Mighty Gecko (MG24)* від *Silicon Labs* є вичерпна документацію від виробника, яка включає не тільки інформаційний лист на ІМС, але й серію загальнодоступних рекомендацій, керівництв і настанов у форматі електронних документів, які були використані під час розробки схеми електричної принципової PI81.464461.001 E3 та будуть використанні в ході розробки приймально-передавального вузла ЕМ.

Silicon Labs – AN0002.2: EFM32 and EFR32 Wireless Gecko Series 2 Hardware Design Considerations [8]

Silicon Labs – AN0016.2: Oscillator Design Considerations [9]

Silicon Labs – AN928.2: EFR32 Series 2 Layout Design Guide [10]

Silicon Labs – AN930.2: EFR32 Series 2 2.4 GHz Matching Guide [11]

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						29
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

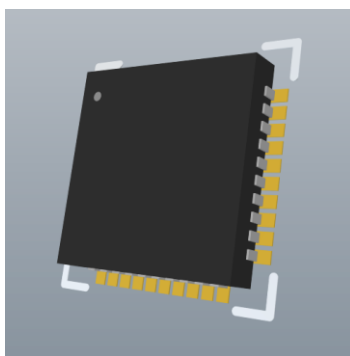


Рисунок 3.19 — 3D-модель ІМС EFR32MG24B020F1536IM40-B від Silicon Labs

DD6 — інтегральна мікросхема цифрового підсилювача зі змінним коефіцієнтом підсилення TQM879006A від Qorvo обрана на роль підсилювача радіосигналу за поєднання наступних характеристик:

- діапазон робочих частот 1,7–2,4 ГГц;
- потужність вхідного радіосигналу до 24,5 дБм;
- потужність вихідного радіосигналу до 43 дБм;
- змінний коефіцієнт власного підсилення до 31,5 дБм з кроком 0,5 дБм;
- максимальна потужність власних шумів рівна 1,5 дБм при підсиленні на рівні 31,5 дБм;
- інтегрований модуль узгодження вихідного хвильового опору ІМС до рівня 50 Ом;
- безвивідний корпус формату VFQFN-28 з плоскими контактними майданчиками, що сприяє зменшенню паразитної індуктивності від виводів;
- керування підсилювачем за допомогою трипроводного інтерфейсу SPI.

ІМС TQM879006A має рекомендації виробника до використання у систе-

мах військових телекомунікацій та базових станціях зв'язку телекомунікаційних операторів, які вказані в офіційній документації на дану ІМС.

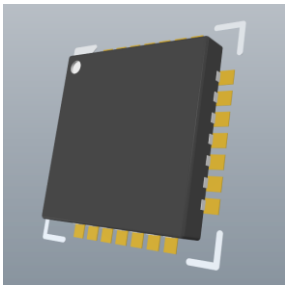


Рисунок 3.20 — 3D-модель ІМС EFR32MG24B020F1536IM40-B від Silicon Labs

3.3 Проектування друкованої плати

Проектування та трасування друкованої плати відбувалось у системі автоматизованого проектування Altium Designer.

На рисунках 3.7–3.8 наведені зображення топології різних шарів ДП, виконані в Altium Designer.

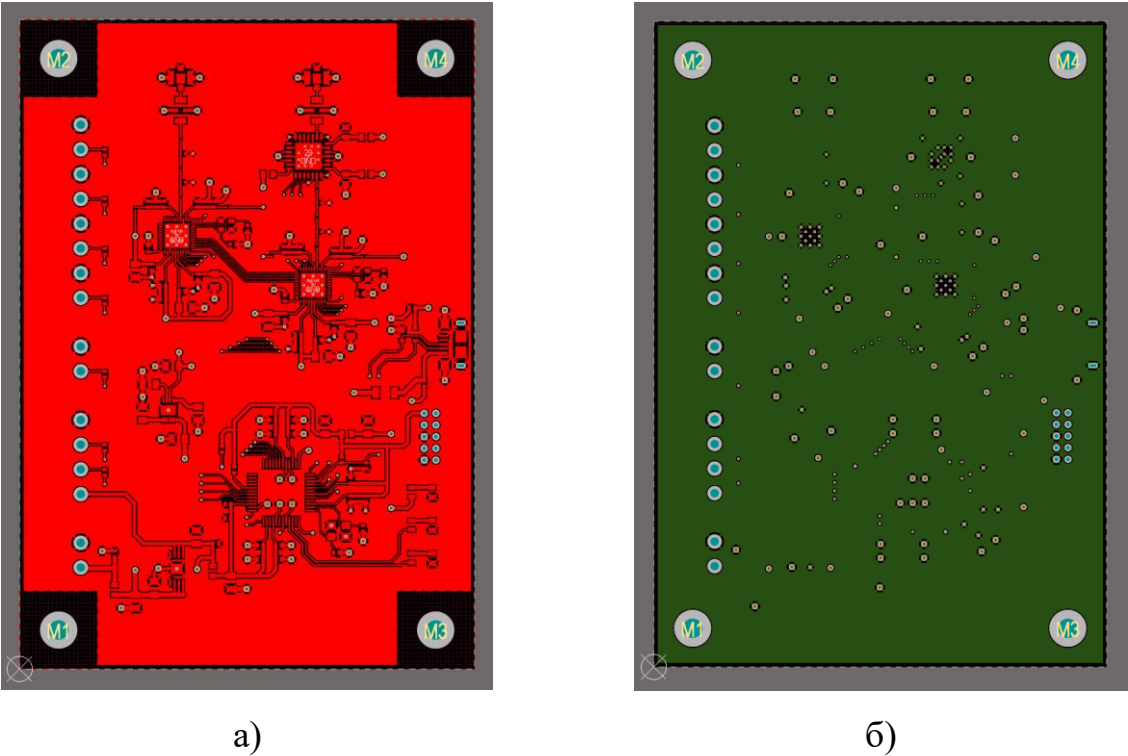
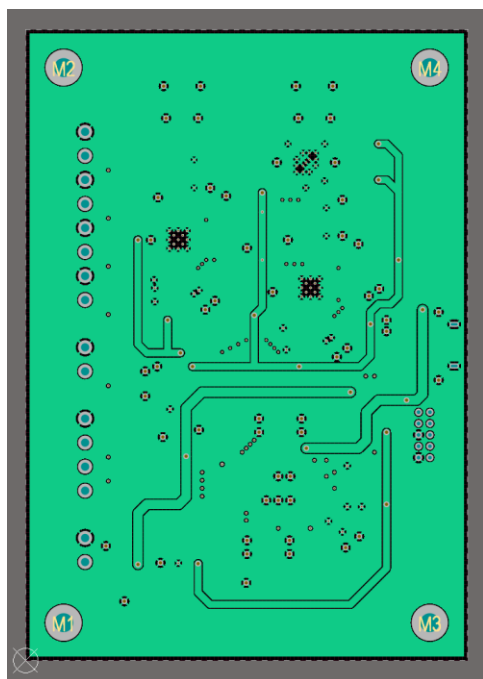
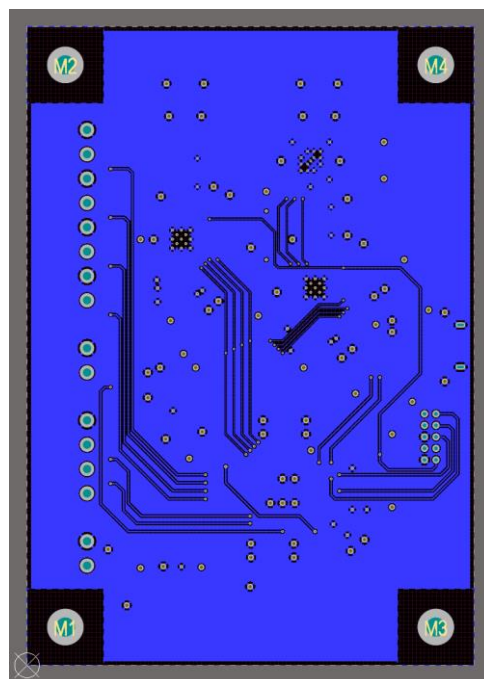


Рисунок 3.21 — Топологія шарів готової ДП. Верхній шар металізації, сигнальний шар (а). Другий шар металізації, шар заземлення (б)



а)



б)

Рисунок 3.22 — Топологія шарів готової ДП. Третій шар металізації, шар живлення (а). Нижній шар металізації, сигнальний шар (б)

На рисунках 3.9–3.10 наведені зображення топології обчислювального та приймально-передавального вузлів ЕМ з нанесеним шаром шовкографії.

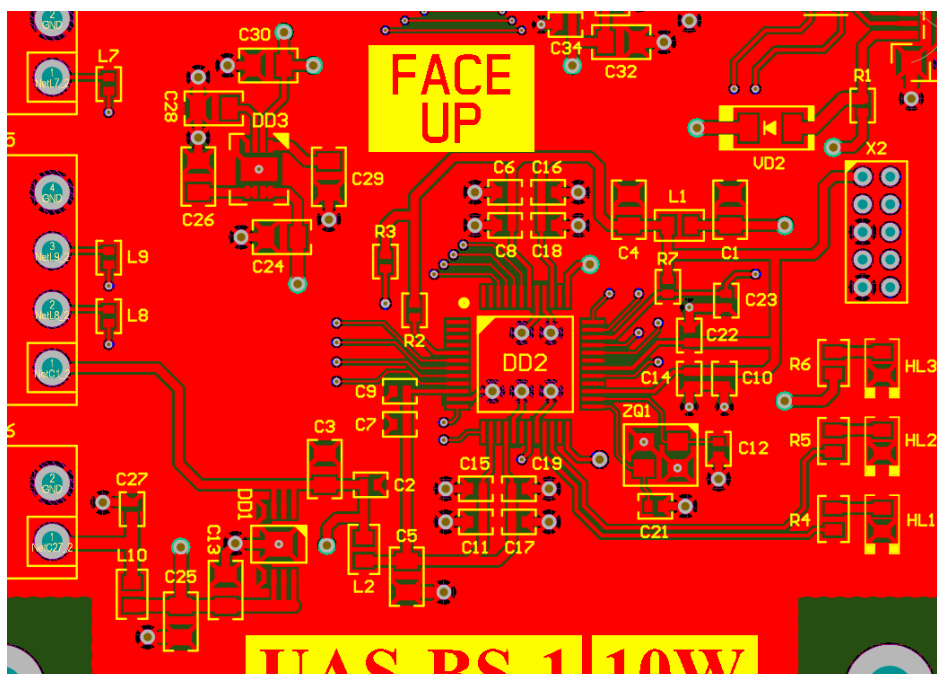


Рисунок 3.23 — Топологія обчислювального вузла ЕМ.

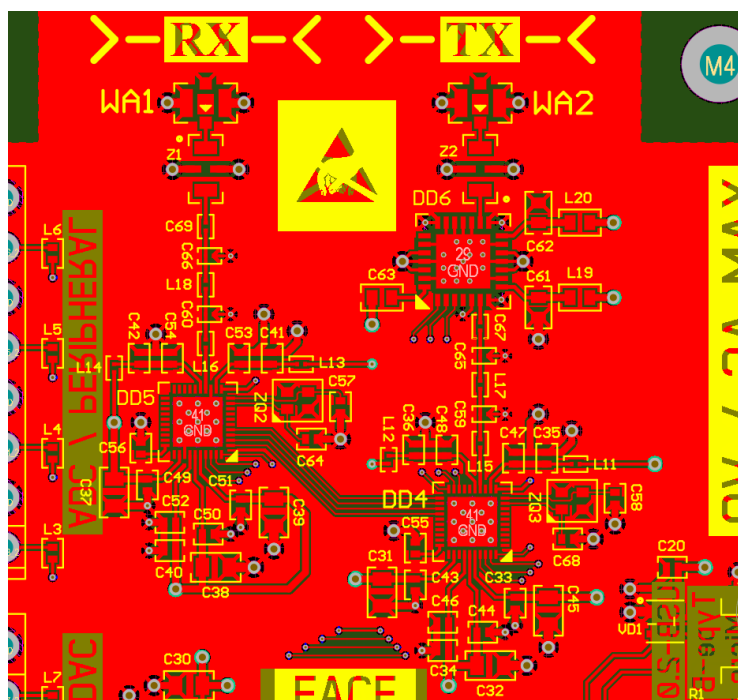


Рисунок 3.24 — Топологія приймально-передавального вузла ЕМ.

Посадкові місця ІМС DD1–DD6 (рис. 3.9–3.10) містять у своєму складі металізовані перехідні отвори для покращення відводу тепла від кристалів ІМС, а також збільшення ширини переходу з верхнього шару металізації до шару землі, що зменшує опір такого переходу.

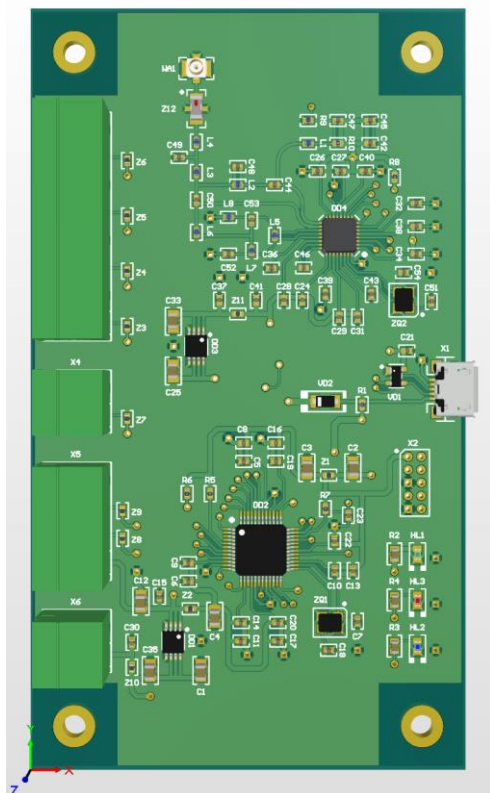
3.4 Результати розробки електронного модуля

3.4.1 Початковий варіант ЕМ

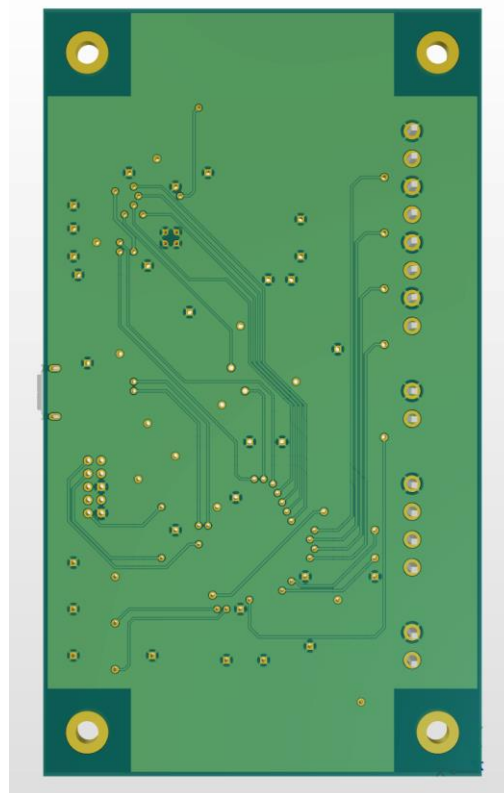
У ході розробки ЕМ було розроблено початковий (рис.3.11) і кінцевий (рис. 3.12) варіанти ЕМ.

Початковий варіант ЕМ відрізняється більш простою конструкцією та трохи меншими габаритними розмірами.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата



а)



б)

Рисунок 3.25 — 3D-модель початкового варіанту ЕМ (100 × 60 мм).

Вид зверху (а) та вид знизу (б)

У той же час початковий варіант ЕМ мав меншу вихідну потужність передавача (40 мВт), який був розрахований на роботу в напівдуплексному режимі та мав складну будову узгоджувальних кіл, що було зумовлено особливостями топології ІМС обраного сигнального процесора (*Texas Instruments CC1125RHBT*).

Внаслідок цього, розділення радіоприймального та радіопередавального трактів на дві окремі лінії з власними сигнальними процесорами для переходу на дуплексний режим зв'язку було б неможливим без збільшення вартості виробництва ДП шляхом застосування більш складних технологій виробництва ДП, збільшення кількості шарів ДП, або ж збільшенням габаритних розмірів ДП і можливим виходом за межі еталонного шаблону дешевих чотиришарових ДП у габаритах до 100 × 100 мм.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI81.464461.001 ПЗ

Лис

34

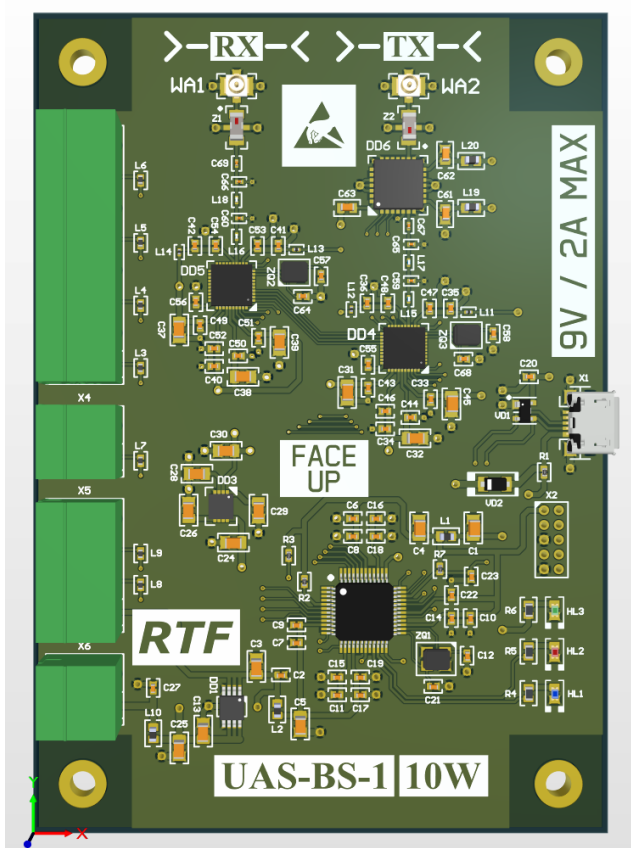
Додатково слід зазначити, що у початковому варіанті ЕМ не передбачалось ІМС підсилювача радіосигналу в радіопередавальному тракті, що сильно обмежувало ефективну дальність такого радіомодуля.

3.4.2 Кінцевий варіант ЕМ

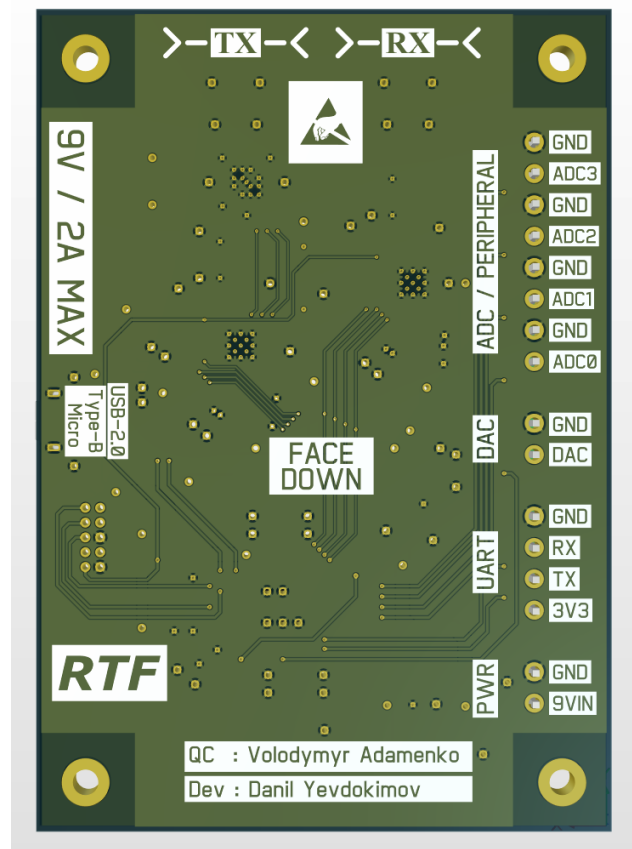
Кінцевий варіант ЕМ розроблявся з урахуванням виправлення недоліків, які були виявлені під час проектування початкового варіанту ЕМ і з цією метою у конструкцію початкового варіанту ЕМ були внесені наступні зміни:

- розділ радіоприймального та радіопередавального трактів;
- ІМС сигнального процесора *Texas Instruments CC1125RHBT* було замінено на дві ІМС *Silicon Labs EFR32MG24B020F1536IM40-B*, кожна з яких працює в сімплексному режимі, за допомогою чого в радіомодулі реалізується дуплексний режим зв'язку;
- додано ІМС підсилювача радіосигналу *Qorvo TQM879006A* в радіопередавальний тракт;
- внаслідок підвищення необхідної напруги живлення приймально-передавального вузла з 3,3 В до 5 В, ІМС лінійного стабілізатора напруги *Linear Technologies LT1965EMS8E-3.3#PBF* було замінено на *Analog Devices ADM7150ACPZ-5.0-R7*.
- незначне збільшення габаритних розмірів з 100 × 60 мм до 100 × 70 мм.

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						35
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 3.26 — 3D-модель кінцевого варіанту ЕМ (100 × 70 мм).

Вид зверху (а) та вид знизу (б)

У результаті проведених доопрацювань початкового варіанту ЕМ, кінцевий варіант ЕМ отримав покращенні характеристики, які відповідають поставленим вимогам за незначного збільшення витрат на виробництво ДП, яке зумовлено збільшенням ширини друкованої плати на 10 мм. Збільшення витрат лежить в межах $\leq 0,1$ долл. США / ДП при замовленні партії ДП у *NextPCB* і залежно від обсягу виробництва.

Кінцевий варіант ЕМ має регульовану вихідну потужність радіосигналу, яка може змінюватись в діапазоні від 0 до 10 Вт з кроком 0,5 дБм і живиться постійною напругою 9 В і максимальним споживанням струму на рівні 2 А.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI81.464461.001 ПЗ

Лис

36

4 РОЗРОБКА КОРПУСУ ПРИСТРОЮ

4.1 Обґрунтування конструкції корпусу

З метою спрощення виробництва і кінцевої збірки пристрою корпус складатиметься з двох основних деталей:

- основа корпусу;
- кришка корпусу.

Герметизація корпусу пристрою не передбачається, оскільки пристрій призначено для розміщення усередині сторонніх об'єктів, які повинні забезпечувати захист пристрою від надмірного потрапляння вологи та пилу.

4.2 Обґрунтування вибору матеріалу корпусу

Під час проектування у конструкції корпусу враховуються вимоги до його механічної міцності.

Для прототипування корпусу доцільно використовувати технологію 3D-друку. Друк при цьому виконується PLA-пластиком, оскільки він швидко розкладається, порівняно з іншими видами пластику, а тому гарно підходить для прототипування. Це обумовлено тим, що невдалі деталі або застарілі прототиби можна легко утилізувати.

Для серійного виготовлення корпусу краще за все використовувати технологію лиття під тиском або термопластичного пресування з використанням, у якості матеріалу, поліметилметакрилату (ПММА).

ПММА обрано через поєднання необхідних механічних характеристик:

- міцність;
- в'язкість;
- гнучкість;
- негігроскопічність;
- стійкість до ударів;
- термопластичність;
- економічна доступність;

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						37
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

— відпрацьовані технологічні процеси виробництва деталей з даного виду пластику.

4.3 Розробка тривимірної моделі корпусу

На рисунку 4.1 зображено тривимірну модель основи корпусу з програми SolidWorks у заповненому та каркасному вигляді, для більш наочного зображення конструкції даної деталі.

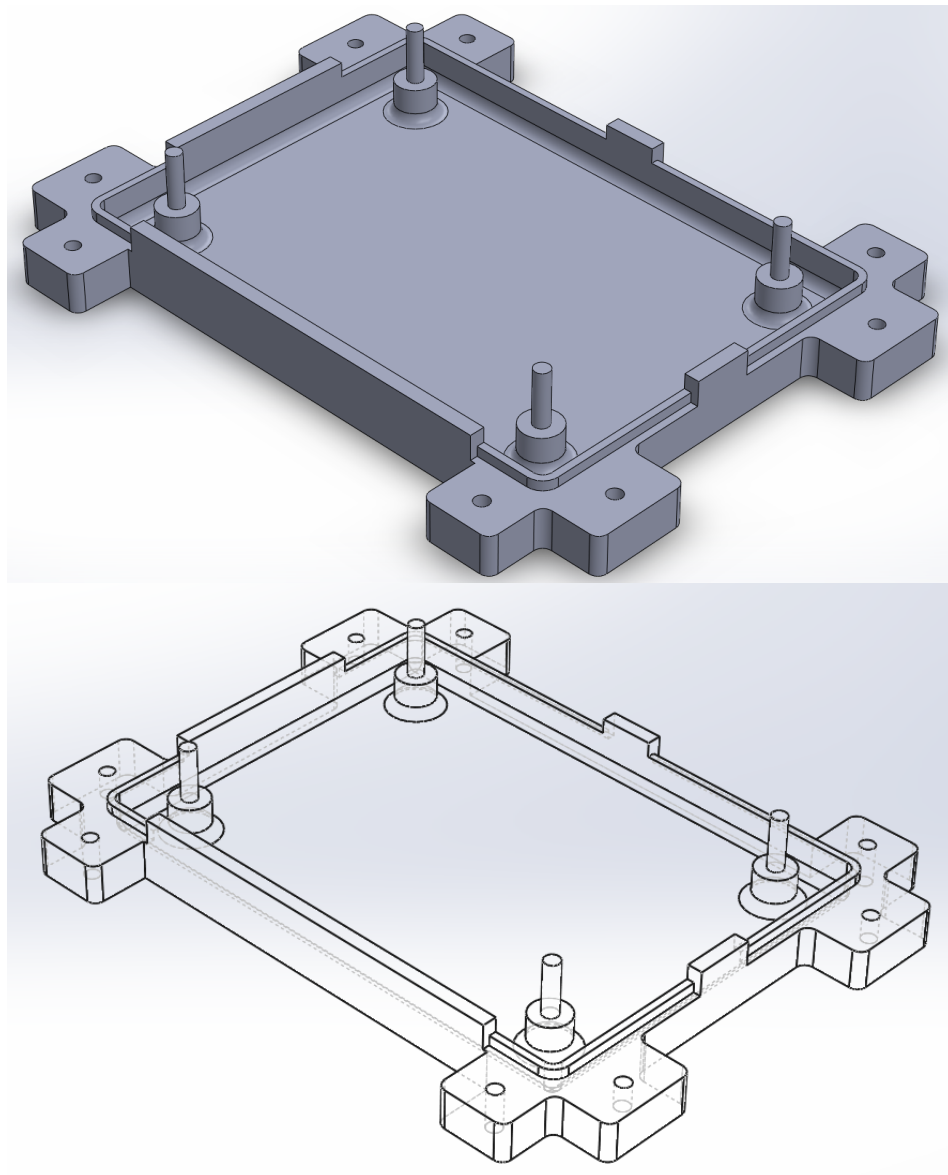


Рисунок 4.1 — 3D-модель основи корпусу.

Ізометричні види

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI81.464461.001 ПЗ

Лис

38

Для кріплення друкованої плати всередину корпусу у дану деталь додано бобишки з направляючими, які повинні проходити крізь отвори кріплення друкованої плати, що дозволяє не використовувати різьбові з'єднання у даному місці конструкції. Це важливо для тих елементів конструкції, де заміна самонарізаючих гвинтів на більші, у випадку зносу тіла деталі від частих закручувань/відкручувань гвинтів, практично неможлива. У даному випадку розміри отворів кріплення друкованої плати обумовлюють максимально можливий діаметр гвинта, більше якого буде пошкоджуватись друкована плата під час її монтажу/демонтажу.

Також висота бобишок визначена таким чином, щоб забезпечити можливість встановлення гумових демпферів, які будуть забезпечувати часткове вібророзв'язування друкованої плати від корпусу, оскільки корпус може кріпитись на об'єкти, що можуть передавати вібрації на електронний модуль.

Оскільки вібраційний вплив може пошкоджувати паяне з'єднання електронних компонентів, а також самі компоненти, то компенсація вібраційного впливу є важливим аспектом проектування даної деталі.

Таким чином найбільш доцільним рішенням є обмеження горизонтального переміщення ДП за допомогою направляючих, а обмеження вертикального переміщення реалізувати за допомогою затискання ДП між основою та кришкою корпусу.

Для більш зручного збирання корпусу передбачені спеціальні виступи основи, які будуть заходити в відповідні заглиблення у кришці, щоб позбавитись горизонтального переміщення кришки корпусу відносно його основи під час з'єднання даних деталей.

Для закріплення корпусу на сторонніх об'єктах або поверхнях використовуються додаткові фланці, через які закручують гвинти наскрізь, з подальшим прикручування до відповідного об'єкту/поверхні.

Тривимірна модель кришки зображена на рисунку 4.2.

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						39
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

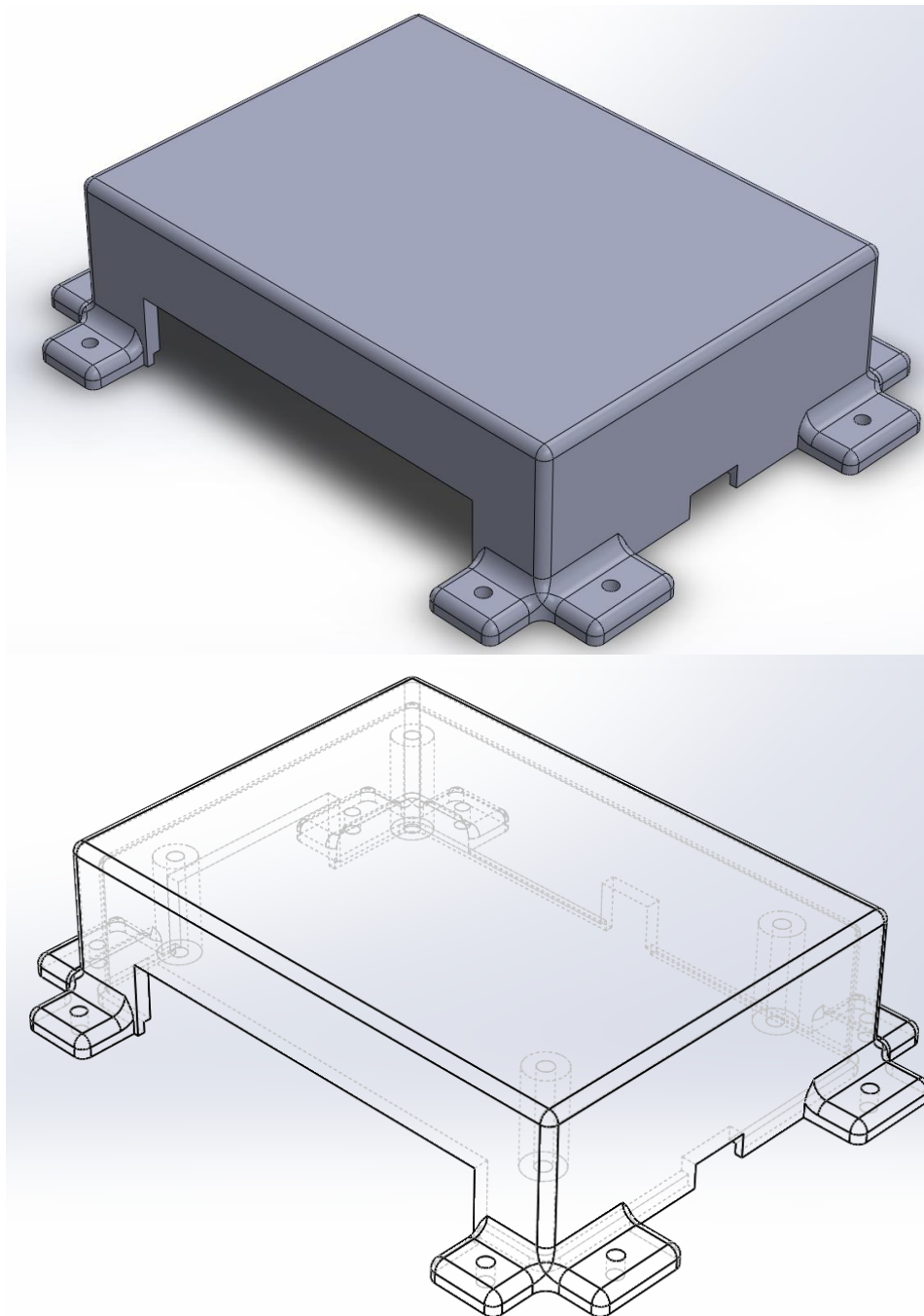


Рисунок 4.2 — 3D-модель кришки корпусу.

Ізометричні види

Кришка корпусу має схожу структуру до його основи, проте замість направляючих є бобишки з отворами, у які заходять направляючі. Також у кришці є отвори для доступу до необхідних роз'ємів (підключення периферійних пристроїв, антен, та USB 2.0 Type-B Micro).

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI81.464461.001 ПЗ

Лис
40

4.4 Результати розробки корпусу пристрою

Корпус у зібраному вигляді з електронним модулем зображено на рисунку 4.3.

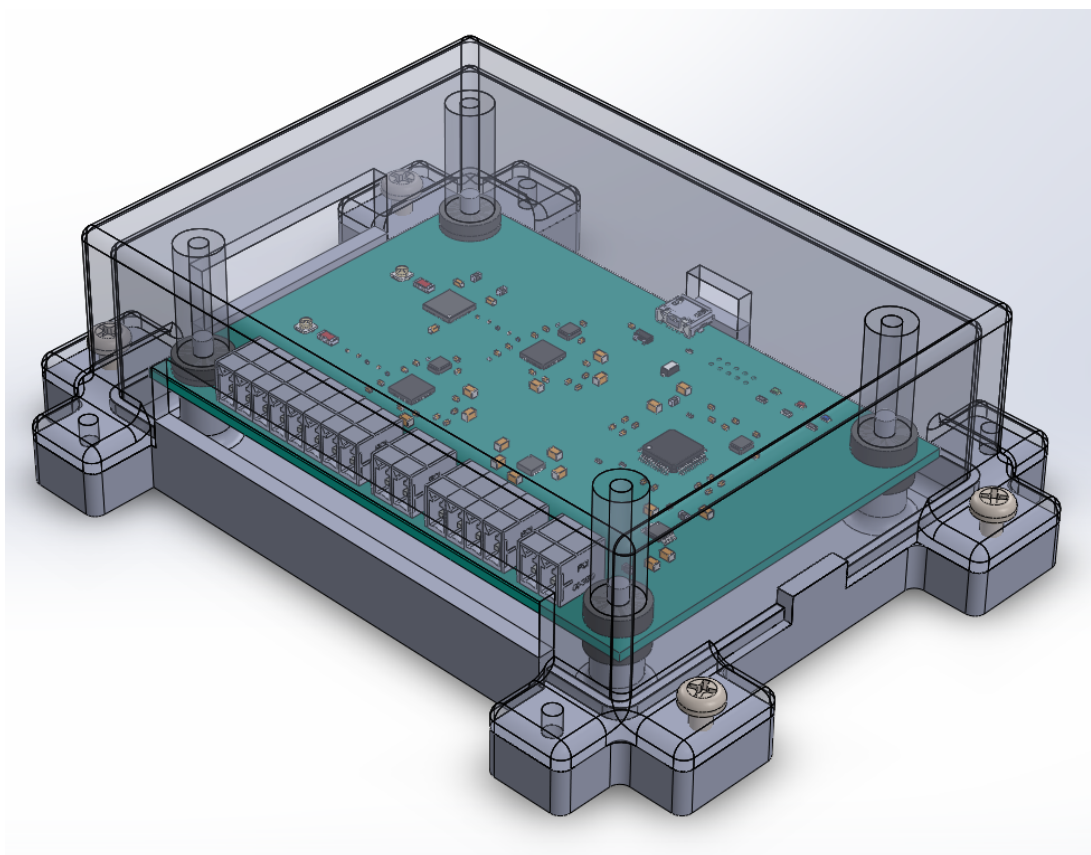


Рисунок 4.3 — 3D-модель готового корпусу з ЕМ.

Ізометричний вид

Для вібраційного розв'язування корпусу та електронного модуля між бо-
бишками та платою встановлено 3-міліметрові демпфуючі гумові прокладки,
які дозволяють гасити помірні ударні навантаження та вібрації у повздовж-
ньому напрямку відносно осі елементів кріплення.

Для надійного з'єднання основи корпусу з кришкою використовуються
чотири, різні за своєю геометрією, пази та кріплення 4-ма гвинтами М3 х 8
через зовнішні фланці.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI81.464461.001 ПЗ

Лис

41

5 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ ПРИСТРОЮ

У результаті розробки пристрою було здійснено проектування електронного модулю та корпусу пристрою.

На рисунку 5.1 зображено готовий пристрій без встановленої кришки.

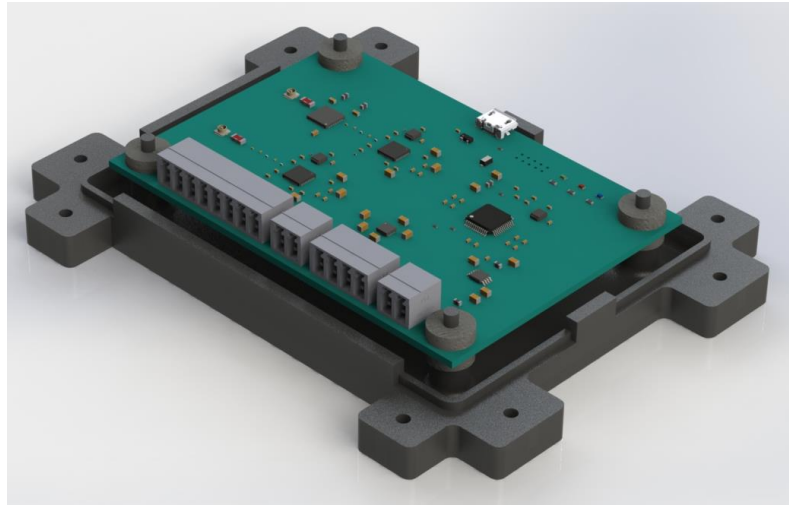


Рисунок 5.1 — 3D-модель готового пристрою без кришки.

Ізометричний вид

На рисунку 5.2 зображено готовий пристрій зі встановленою кришкою.

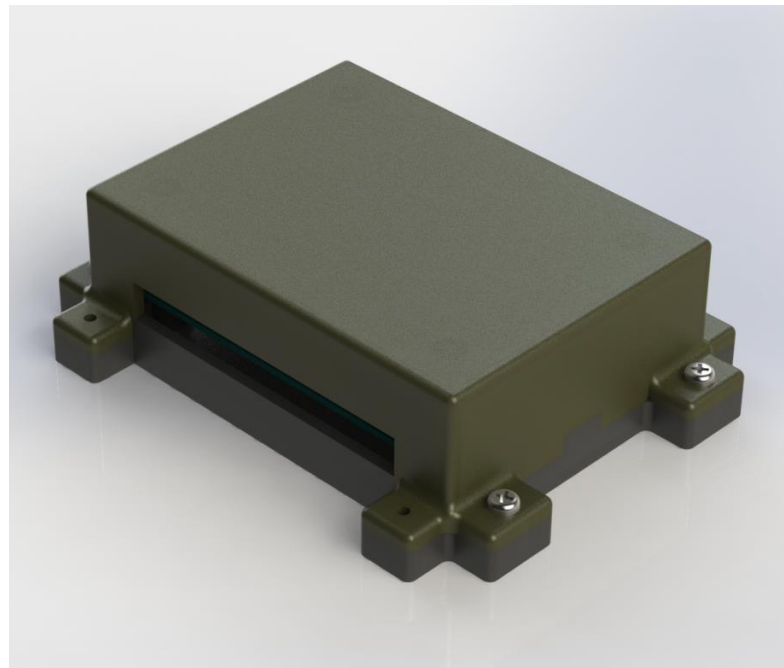


Рисунок 5.2 — 3D-модель готового пристрою з кришкою.

Ізометричний вид

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						42
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 5.3 зображено каркасний вигляд готового пристрою.

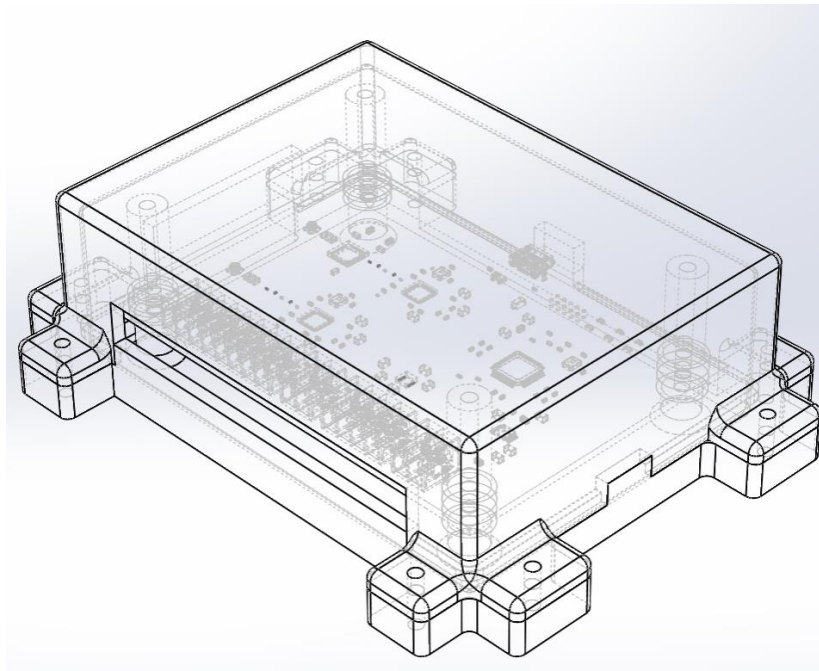


Рисунок 5.3 — 3D-модель готового пристрою з кришкою.

Каркасный вид (ізометричний вид)

У результаті проектування отримано пристрій, що відповідає необхідним параметрам, встановленим у технічному завданні:

- робоча частота становить 2,4 ГГц;
- вихідна потужність радіосигналу: від 0 до 10 Вт з кроком 0,5 дБм;
- максимальна дальність зв'язку до 20 км;
- мала вага (орієнтовна маса 0,3 кг);
- компактність (габаритні розміри 108 x 138 x 41 мм);
- наявність елементів кріплення для встановлення пристрою;
- наявність необхідних роз'ємів;
- використання заданого типу модуляції для радіотехнічної сумісності з БЛА та ПДК.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PI81.464461.001 ПЗ

Лис
43

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проекту розроблено базову станцію зв'язку, яка відповідає заявленим характеристикам, що наведені у технічному завданні на безпілотний авіаційний комплекс.

Максимальна дальність зв'язку між БСЗ та ПДК становить до 10 км при максимальній дальності між БСЗ і БЛА до 20 км., що потенційно дозволяє розширити ефективний радіус дії комплексу навіть до 30 км, що перевищує показник заявлений в технічному завданні на БАК (20 км).

Розміри та вага готового пристрою дозволяють розміщувати його на невеликій стабілізованій опорно-поворотній платформі для корекції направленості випромінювання антени БСЗ по азимуту та куту місця з метою покращення якості радіозв'язку з БЛА у випадку використання у складі БСЗ антен направленої типу.

Електричні параметри розробленого пристрою дозволяють забезпечити високу автономність БСЗ при живленні від акумуляторної батареї.

Друкована плата електронного модуля складається з чотирьох шарів металізації та виготовляється за допомогою багат шарової технології методом металізації наскрізних отворів. Вибір кількості шарів металізації та технології виробництва ДП робився з міркувань досягнення мінімально можливої вартості та короткого технологічного циклу виробництва ДП. Габаритні розміри плати: 100x70 мм

Для забезпечення зручності експлуатації та обслуговування БСЗ, на обох сторонах плати при виробництві ДП за допомогою шовкографії наносяться функціональні написи та зображення, а також назва готового пристрою, потужність передавача та максимальні значення споживаної напруги та струму (9 В / 2 А) електронним модулем.

При подальшій роботі над БСЗ планується можливий розвиток в напрямку створення периферійного модуля ретрансляції відеосигналу між БЛА та

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						44
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ПДК на більшій відстані або створення власної компактною опорно-поворотною стабілізованою платформи для розміщення БСЗ на складній місцевості.

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						45
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. FCC & IC Certified 2.4 GHz Transmitter And Receiver Module RF2401Pro Adopts nRF24L01+ Chip —
<https://www.nicerf.com/products/detail/2-4-ghz-transmitter-and-receiver-rf2401pro.html>
2. nRF24L01 PA LNA nRF24L01P 2.4GHz Module 27dBm Wireless Transceiver Module Long Distance Small Size for Smart Home E01-2G4M27D —
https://www.aliexpress.com/item/1005001803228202.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.42771b13EMerfC&algo_pvid=f5856f76-2f37-4903-b7dc-a5bac047ee99&algo_exp_id=f5856f76-2f37-4903-b7dc-a5bac047ee99-0&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000023340756917%22%7D&pdp_npi=2%40dis%21RUB%21%21302.15%21%21%21%21%21%40211675ce16556746026084789ee3a3%2112000023340756917%21sea
3. CC1352P SMD IoT Transceiver Module 868MHz 915MHz 2.4GHz E79-900DM2005S PA ARM IoT Transmitter and Receiver —
https://www.aliexpress.com/item/4000510728606.html?spm=a2g0o.search0304.0.0.4e871f51zP8dpd&algo_pvid=9e46416f-c494-4fb3-8011-9bd67befe1ce&algo_exp_id=9e46416f-c494-4fb3-8011-9bd67befe1ce-4&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%22-1%22%7D
4. ГОСТ 15150-69 [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<http://docs.cntd.ru/document/1200003320> — 12.06.2022. — Назва з екрану.
5. ГОСТ 16019-2001 [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<http://docs.cntd.ru/document/gost-16019-2001> — 12.06.2022. — Назва з екрану.
6. Класифікатор ЕСКД [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<http://classinform.ru/ok-eskd/kod.html> — 12.06.2022. — Назва з екрану.
7. NextPCB PCB Capabilities [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<https://www.nextpcb.com/pcb-capabilities> — 12.06.2022. — Назва з екрану.
8. Silicon Labs – AN0002.2 [Електронний ресурс]. — Режим доступу:
<https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an0002.2-efr32->

					PI81.464461.001 ПЗ	Лис
						46
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

[efm32-series-2-hardware-design-considerations.pdf](#) — 12.06.2022. — Назва з екрану.

9. *Silicon Labs* – AN0016.2 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an0016.2-efr32-series-2-oscillator-design-considerations.pdf> — 12.06.2022. — Назва з екрану.

10. *Silicon Labs* – AN928.2 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an928.2-efr32-series2-layout-design-guide.pdf> — 12.06.2022. — Назва з екрану.

11. *Silicon Labs* – AN930.2 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an930.2-efr32-series-2.pdf> — 12.06.2022. — Назва з екрану.

12. *Silicon Labs* – AN0948.2 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an0948.2-efr32-series-2-power-configurations-and-dcdc.pdf> — 12.06.2022. — Назва з екрану.

					<i>PI81.464461.001 ПЗ</i>	Лис
						47
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В. о. зав. кафедрою ПРЕ

_____ Михайло СТЕПАНОВ

«___» _____ 2022 р.

«УЗГОДЖЕНО»

Керівник проекту

 Володимир АДАМЕНКО

«___» _____ 2022 р.

Безпілотний авіаційний комплекс

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

PI81.202138.001 ТЗ

2022 р.

1. НАЗВА КР, ШИФР І ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ КР

1.1 Назва виробу:

Безпілотний авіаційний комплекс.

1.2 Підстава для виконання:

Завдання видане кафедрою прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського. Наказ №_____ від _____

2. ВИКОНАВЦІ:

Бичков О. Д., РІ-81, РТФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, частина: «Безпілотний авіаційний комплекс. Пульт дистанційного керування»

Броварник С. А., РІ-81, РТФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, частина «Безпілотний авіаційний комплекс. Електронні модулі літального апарату»

Євдокімов Д. О., РІ-81, РТФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, частина «Безпілотний авіаційний комплекс. Базова станція зв'язку»

3. ВИРОБНИКИ

— КПІ ім. Ігоря Сікорського, підготовка комплекту технічної документації.

— Підприємство-виробник друкованих плат: AllPCB (КНР). Виготовлення відповідно до 4-го класу точності за допомогою багатопарової технології методом пошарового нарощування.

— Підприємство-виробник пластикових деталей: Fow Mould (КНР). Допуски деталей відповідно до 14-го квалітету.

4. МЕТА ВИКОНАННЯ КР І ПРИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКЦІЇ

4.1 Мета виконання:

Створення компактного безпілотного авіаційного комплексу тактичного рівня для оптичного відеоспостереження та автоматичного супроводження об'єктів.

					PI81.202138.001 T3				
ЗМ.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата	Безпілотний авіаційний комплекс. Електронні модулі літального апарату	Лім.	Лист	Листів	
Розробив	Броварник С.								
Перевірів	Адаменко В.						1		
						PI-81, РТФ			
Н. Контр.	Адаменко В.								
Затвер-	Адаменко В.								

4.2 Призначення продукції:

Даний виріб призначений для використання у якості інструменту спостереження за місцевістю, рухомими та нерухомими об'єктами у світлу пору доби за нормальних погодних умов, які знаходяться за межами прямої видимості оператора комплексу.

5. СКЛАД ПРОДУКЦІЇ

Комплекс складається з:

- Безпілотного літального апарату (БЛА);
- Пульта дистанційного керування (ПДК);
- Базової станції зв'язку (БСЗ).

До складу продукції входять наступні покупні комплектуючі вироби:

- Безколекторні електромотори;
- Повітряні гвинти;
- Гіростабілізована платформа оптичного модуля;
- Оптичний модуль у складі денної відеокамери;
- Елементи живлення (акумуляторні батареї);
- Кріпильні матеріали;
- Провідники, дроти, шлейфи;
- Радіоелектронні компоненти.

6. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

6.1 Вимоги призначення комплексу

- Максимальна дальність радіозв'язку між ПДК та БЛА — 10 км;
- Максимальна дальність радіозв'язку між БСЗ та БЛА — 20 км;
- Максимальний час роботи комплексу без підзарядки — 35 хв;
- Робоча частота — 2,4 ГГц (радіокерування), 1,2 ГГц (передача відеосигналу);

					PI81.202138.001 T3			
					Безпілотний авіаційний комплекс. Електронні модулі літального апарату	Літ.	Лист	Листів
ЗМ.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата			1	
Розробив	Броварник С.							
Перевірів	Адаменко В.							
Н. Контр.	Адаменко В.				PI-81, РТФ			
Затвер-	Адаменко В.							

6.2 Вимоги до БЛА

- Максимальний час польоту (без вітру) — 40 хв;
- Максимальний час зависання (без вітру) — 35 хв;
- Максимальна швидкість підйому — 3 м/с;
- Максимальна швидкість спуску — 3 м/с;
- Максимальна швидкість польоту — 10 м/с;
- Максимальна висота польоту (над рівнем моря) — 4 км;
- Максимальна злітна вага — 1 кг;
- Максимальна дальність польоту — 20 км;
- Максимально допустима швидкість вітру — 10 м/с.
- Робота з GPS, Galileo;

6.3 Вимоги до ПДК

- Максимальний час автономної роботи — 5 год;
- Наявність роз'ємів USB Type-C та microSD.

6.4 Вимоги до БСЗ

- Максимальний час автономної роботи (направлена антена) — 2 год;
- Максимальний час автономної роботи (ненаправлена антена) — 5 год;
- Можливість роботи з направленими та ненаправленими антенами;

6.5 Вимоги життєздатності та стійкості до зовнішніх факторів

Кліматичне виконання за ГОСТ 15150-69 УХЛ-1.1.

Умови експлуатації згідно ГОСТ 16019-2001, Н7.

6.6 Вимоги надійності

Напрацювання на відмову комплексу (без врахування відмов акумуляторів) — не менше 1000 годин;

Напрацювання на відмову акумулятора — 150 год.

6.7 Вимоги до конструкції

Основні конструкційні вимоги складових частин уточнюють у процесі роботи.

					<i>PI81.202138.001 T3</i>	Лис
						3
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

6.8 Вимоги технологічності

Вимоги до виробничої, експлуатаційної та ремонтної технологічності уточнюються у процесі роботи та узгоджуються на етапі підготовки до виробництва дослідного зразка.

6.9 Вимоги уніфікації та стандартизації

Кількісні показники уніфікації та стандартизації не висуваються.

6.10 Вимоги до дизайну і ергономіки

Комплекс повинен мати мінімалістичний та інтуїтивно зрозумілий дизайн.

Пульт дистанційного керування повинен мати ергономічну форму розраховану на користування людьми різного віку та статі.

7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ВИМОГИ

Середня собівартість виготовлення пристрою при серійному виробництві не має перевищувати 500 доларів США.

8. ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація має відповідати вимогам ДСТУ та вимогам Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД).

9. СТАДІЇ ТА ЕТАПИ ПРОЕКТУ

- Написання ТЗ та його аналіз;
- Технічна пропозиція (аналіз варіантів конструкції);
- Вибір компонентів та матеріалів;
- Проектування оригінального (друкованого) вузла;
- Розрахунки, що підтверджують працездатність;
- Оформлення пояснювальної записки;
- Розробка креслень.

					PI81.202138.001 ТЗ	Лис
						4
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

10. ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ ПРОЕКТУ

При завершенні проекту подаються пояснювальні записки на складові частини п. 5 та набір відповідних проектно-конструкторських документів. захист проекту проводиться публічно в установленого порядку.

					<i>PI81.202138.001 T3</i>	Лис
						5
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б. РОЗРАХУНКИ МІНІМАЛЬНОЇ ПЛОЩІ ДП

№	Позначення	Кількість	Площа (мм кв.)	К	Загальна площа (мм кв.)
1	C1, C3, C4, C5, C13, C24, C25, C26, C28, C29, C30, C31, C32, C33, C37, C38, C39	17	9,6	1	163,2
2	C2, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20, C22, C23, C27, C34, C35, C36, C40, C41, C42, C43, C44, C45, C46, C49, C50, C51, C52, C55, C56	33	4,32	1	142,56
3	C12, C21, C47, C48, C53, C54, C57, C58, C64, C68	10	4,32	1	43,2
4	C59, C60, C65, C66	4	2,8	1	11,2
5	C61, C62, C63	3	7,48	1	22,44
6	C67, C69	2	2,8	1	5,6
7	DD1	1	19,988	1,5	29,982
8	DD2	1	107,122	3	321,366
9	DD3	1	19,2	1,5	28,8
10	DD4, DD5	2	38,44	3	230,64
11	DD6	1	54,76	2	109,52
12	HL1	1	9,346	1	9,346
13	HL2	1	9,346	1	9,346
14	HL3	1	9,346	1	9,346
15	L1, L2, L10, L19, L20	5	7,48	1	37,4
16	L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9	7	4,32	1	30,24
17	L11, L12, L13, L14	4	2,8	1	11,2
18	L15, L16, L17, L18	4	2,8	1	11,2
19	R1, R2, R3	3	4,32	1	12,96
20	R4, R5, R6	3	7,04	1	21,12
21	R7	1	4,32	1	4,32
22	VD1	1	12,92	1,5	19,38
23	VD2	1	18,9	1	18,9
24	WA1, WA2	2	20,5	1,5	61,5
25	X1	1	59,044	1,5	88,566
26	X2	1	39,48	2	78,96
27	X3	1	306,564	1,5	459,846
28	X4, X6	2	85,462	1	170,924
29	X5	1	159,162	1,5	238,743
30	Z1, Z2	2	21,06	1,5	63,18
31	ZQ1	1	21	1,5	31,5
32	ZQ2, ZQ3	2	13,6	1,5	40,8
Мінімальна площа друкованої плати (мм кв.) :					2537,285

ДОДАТОК В. РОЗРАХУНОК ШИРИНИ ПРОВІДНИКІВ ТА ЗАЗОРУ МІЖ НИМИ

Розрахунок ширини друкованих провідників для всіх присутніх у схемі рівнів сигналу

Для сигнальних провідників з напругою 3,3 В:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t_1 у вузькому місці, мм:

Вибираємо за 4 класом точності $t_{minD_S} := 0.1\text{mm}$
Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta t_{no_S} := -0.03\text{mm}$
$$t_{1V_S} := t_{minD_S} + |\Delta t_{no_S}| = 0.13\text{mm}$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t_1 у широкому місці, мм:

Вибираємо за класом точності (на один менше) $t_{minD_S} := 0.15\text{mm}$
Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta t_{no_S} := -0.03\text{mm}$

$$t_{1III_S} := t_{minD_S} + |\Delta t_{no_S}| = 0.18\text{mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника t_2 з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників (Ом*мм²/м)- $\rho := 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Довжина провідника (м)- $l_S := 0.10\text{m}$
Товщина фольги (мм)- $h_S := 35 \cdot 10^{-3} \text{mm}$
Прикладена напруга (В)- $U_{жив_S} := 3.3\text{V}$
Максимальний струм (А)- $I_{max_S} := 0.1\text{A}$

$$t_{2S} := \frac{l_S \cdot I_{max_S} \cdot \rho}{h_S \cdot U_{жив_S} \cdot 0.03} = 0.051\text{mm}$$

Прикладена напруга і максимальний струм визначаються за схемою електричною принциповою та документації до електронних компонентів. Довжина провідника обирається згідно довжини з'єднання в файлі проекту друкованої плати.

Мінімально допустиму ширину провідника t_3 з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (А)- $I_{max_S} := 0.1\text{A}$
Товщина фольги (мм)- $h_S := 35 \cdot 10^{-3} \text{mm}$
Допустима щільність струму в провіднику (А/мм²)- $j_S := 20 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$
$$t_{3S} := \frac{I_{max_S}}{h_S \cdot j_S} = 0.143\text{mm}$$

Для силових провідників з напругою 3,3 В:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t_1 у вузькому місці, мм:

Вибираємо за 4 класом точності $t_{minD_P} := 0.1\text{mm}$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta t_{no_P} := -0.03\text{mm}$

$$t_{1V_P} := t_{minD_P} + |\Delta t_{no_P}| = 0.13 \cdot \text{mm}$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t_1 у широкому місці, мм:

Вибираємо за класом точності- $t_{minD_P} := 0.15\text{mm}$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення) $\Delta t_{no_P} := -0.03\text{mm}$

$$t_{1\Pi_P} := t_{minD_P} + |\Delta t_{no_P}| = 0.18 \cdot \text{mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника t_2 з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників ($\text{Om} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$)- $\rho := 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

Довжина провідника (м)- $l_P := 0.10\text{m}$

Товщина фольги (мм)- $h_P := 35 \cdot 10^{-3} \text{mm}$

Прикладена напруга (В)- $U_{жив_P} := 3.3\text{V}$

Максимальний струм (А)- $I_{max_P} := 0.6\text{A}$

$$t_{2P} := \frac{l_P \cdot I_{max_P} \cdot \rho}{h_P \cdot U_{жив_P} \cdot 0.03} = 0.303 \cdot \text{mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника t_3 з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (мА)- $I_{max_P} := 0.6\text{A}$

Товщина фольги (мм)- $h_P := 35 \cdot 10^{-3} \text{mm}$

Допустима щільність струму в провіднику ($\text{A}/\text{мм}^2$)- $j_P := 20 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$

$$t_{3P} := \frac{I_{max_P}}{h_P \cdot j_P} = 0.857 \cdot \text{mm}$$

З розрахованих даних обираємо ширину провідників у вузькому та широкому місці, при цьому повинна виконуватись умова:

Для силових з напругою 3,3 В:

$$t_{\min_v} \geq \begin{cases} t1V_P & \text{у вузькому місці} \\ t2_P \\ t3_P \end{cases} \quad t_{\min_w} \geq \begin{cases} t1III_P & \text{у широкому місці} \\ t2_P \\ t3_P \end{cases}$$

$$t_{\min_vP} := \max(t1V_P, t2_P, t3_P) = 0.857 \cdot \text{mm} \quad t_{\min_wP} := \max(t1III_P, t2_P, t3_P) = 0.857 \cdot \text{mm}$$

Для сигнальних з напругою 3,3 В:

$$t_{\min_v} \geq \begin{cases} t1V_S & \text{у вузькому місці} \\ t2_S \\ t3_S \end{cases} \quad t_{\min_w} \geq \begin{cases} t1III_S & \text{у широкому місці} \\ t2_S \\ t3_S \end{cases}$$

$$t_{\min_vS} := \max(t1V_S, t2_S, t3_S) = 0.143 \cdot \text{mm} \quad t_{\min_wS} := \max(t1III_S, t2_S, t3_S) = 0.18 \cdot \text{mm}$$

Рекомендована ширина для сигнального провідника $t_{\min_wS} = 0.18 \cdot \text{mm}$

Рекомендована ширина для силового провідника $t_{\min_wP} = 0.857 \cdot \text{mm}$

Якщо не можливо провести провідник шириною $t_{\min_wP} = 0.857 \cdot \text{mm}$ та $t_{\min_wS} = 0.18 \cdot \text{mm}$

то можна використувати ширину провідників $t_{\min_vP} = 0.857 \cdot \text{mm}$ та $t_{\min_vS} = 0.143 \cdot \text{mm}$

Розрахунок зазорів S між елементами друкованої монтажу:

Найменша номінальна відстань S_m між елементами провідникового рисунку (між двома провідниками)

Мінімально допустима відстань між сусідніми друкованими об'єктами (мм)- $S_m := 0.1 \text{mm}$

Допуск на ширину провідника (верхнє відхилення) (мм)- $\Delta_{tbo} := 0.03 \text{mm}$

$$S_{\min} := S_m + \Delta_{tbo} = 0.13 \cdot \text{mm}$$

Для силових провідників з напругою 5 В:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t1 у вузькому місці, мм:

Вибираємо за 4 класом точності

$$t_{minDp} := 0.1mm$$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення)

$$\Delta t_{noDp} := -0.03mm$$

$$t_{1Vp} := t_{minDp} + |\Delta t_{noDp}| = 0.13 \cdot mm$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника t1 у широкому місці, мм:

Вибираємо за класом точності-

$$t_{minDp} := 0.15mm$$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення)

$$\Delta t_{noDp} := -0.03mm$$

$$t_{1IIIp} := t_{minDp} + |\Delta t_{noDp}| = 0.18 \cdot mm$$

Мінімально допустиму ширину провідника t2 з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників (Ом*мм²/м)- $\rho := 0.0175 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$

Довжина провідника (м)- $l_p := 0.10m$

Товщина фольги (мм)- $h_p := 35 \cdot 10^{-3} mm$

Прикладена напруга (В)- $U_{живp} := 5V$

Максимальний струм (А)- $I_{maxp} := 0.8A$

$$t_{2p} := \frac{l_p \cdot I_{maxp} \cdot \rho}{h_p \cdot U_{живp} \cdot 0.03} = 0.267 \cdot mm$$

Мінімально допустиму ширину провідника t3 з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (мА)- $I_{maxp} := 0.8A$

Товщина фольги (мм)- $h_p := 35 \cdot 10^{-3} mm$

Допустима щільність струму в провіднику (А/мм²)- $j_p := 20 \frac{A}{mm^2}$

$$t_{3p} := \frac{I_{maxp}}{h_p \cdot j_p} = 1.143 \cdot mm$$

$$t_{min_vp} := \max(t_{1Vp}, t_{2p}, t_{3p}) = 1.143 \cdot mm \quad t_{min_wp} := \max(t_{1IIIp}, t_{2p}, t_{3p}) = 1.143 \cdot mm$$

Рекомендована ширина для силового провідника $t_{min_wp} = 1.143 \cdot mm$

Якщо не можливо провести провідник шириною $t_{min_wp} = 1.143 \cdot mm$

то можна використувати ширину провідників $t_{min_vp} = 1.143 \cdot mm$

Для силових провідників з напругою 9 В:

Мінімальне значення ширини друкованого провідника $t1$ у вузькому місці, мм:

Вибираємо за 4 класом точності

$$t_{minD_P} := 0.1 \text{ mm}$$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення)

$$\Delta t_{no_P} := -0.03 \text{ mm}$$

$$t1V_P := t_{minD_P} + |\Delta t_{no_P}| = 0.13 \cdot \text{mm}$$

Мінімальне значення ширини друкованого провідника $t1$ у широкому місці, мм:

Вибираємо за класом точності-

$$t_{minD_P} := 0.15 \text{ mm}$$

Допуск на ширину провідника (нижнє відхилення)

$$\Delta t_{no_P} := -0.03 \text{ mm}$$

$$t1III_P := t_{minD_P} + |\Delta t_{no_P}| = 0.18 \cdot \text{mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника $t2$ з урахуванням допустимого падіння напруги на ньому (3%):

Питомий опір провідників ($\text{Om}^* \text{mm}^2/\text{m}$)- $\rho := 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

Довжина провідника (м)- $l_P := 0.10 \text{ m}$

Товщина фольги (мм)- $h_P := 35 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$

Прикладена напруга (В)- $U_{жив_P} := 9 \text{ V}$

Максимальний струм (А)- $I_{max_P} := 2 \text{ A}$

$$t2_P := \frac{l_P \cdot I_{max_P} \cdot \rho}{h_P \cdot U_{жив_P} \cdot 0.03} = 0.37 \cdot \text{mm}$$

Мінімально допустиму ширину провідника $t3$ з урахуванням допустимого рівня струму на ньому:

Максимальний струм (мА)- $I_{max_P} := 2 \text{ A}$

Товщина фольги (мм)- $h_P := 35 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$

Допустима щільність струму в провіднику (A/mm^2)- $j_P := 20 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$

$$t3_P := \frac{I_{max_P}}{h_P \cdot j_P} = 2.857 \cdot \text{mm}$$

$$t_{min_v_P} := \max(t1V_P, t2_P, t3_P) = 2.857 \cdot \text{mm} \quad t_{min_w_P} := \max(t1III_P, t2_P, t3_P) = 2.857 \cdot \text{mm}$$

Рекомендована ширина для силового провідника $t_{min_w_P} = 2.857 \cdot \text{mm}$

Якщо не можливо провести провідник шириною $t_{min_w_P} = 2.857 \cdot \text{mm}$

то можна використувати ширину провідників $t_{min_v_P} = 2.857 \cdot \text{mm}$

ДОДАТОК Г. ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ

Позн.	Найменування	Кіл.	Прим.					
	Конденсатори							
C1	CL21A106KBYQNNE - Samsung, 10 мкФ, ±10%, 50 В	1						
C2	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	1						
C3-C5	CL21A106KBYQNNE - Samsung, 10 мкФ, ±10%, 50 В	3						
C6, C7	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	1						
C8, C9	CL05B103KB5NNNC - Samsung, 10 нФ, ±10%, 50 В	2						
C10, C11	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	2						
C12	CC0402JRNPO9BN180 - Yageo, 18 нФ, ±5%, 50 В	1						
C13	CL21A106KBYQNNE - Samsung, 10 мкФ, ±10%, 50 В	1						
C14, C15	CL05B103KB5NNNC - Samsung, 10 нФ, ±10%, 50 В	2						
C16, C17	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	2						
C18, C19	CL05B103KB5NNNC - Samsung, 10 нФ, ±10%, 50 В	2						
C20	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	1						
C21	CC0402JRNPO9BN180 - Yageo, 18 нФ, ±5%, 50 В	1						
C22, C23	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	2						
C24, C25	CL21A106KBYQNNE - Samsung, 10 мкФ, ±10%, 50 В	2						
C26	CL21B105KBFNNNG - Samsung, 1 мкФ, ±10%, 50 В	1						
C27	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	1						
C28	CL21B105KBFNNNG - Samsung, 1 мкФ, ±10%, 50 В	1						
C29, C30	CL21A106KBYQNNE - Samsung, 10 мкФ, ±10%, 50 В	2						
C31	CL21A106KBYQNNE - Samsung, 10 мкФ, ±10%, 50 В	1						
C32, C33	CL21B105KBFNNNG - Samsung, 1 мкФ, ±10%, 50 В	2						
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	PI81.464461.001 ПЕ			
Розроб.	Євдокімов Д. О.				Безпілотний авіаційний комплекс. Базова станція зв'язку	Літ.	Лист	Листів
Перев.	Адаменко В. О.						1	4
Т.конт	Адаменко В. О.					PI-81, РТФ, КПІ		
Н.конт	Адаменко В. О.							
Затв.	Адаменко В. О.							

Позн.	Найменування	Кіл.	Прим.			
C34	CL05A275KA5NQNC - Samsung, 2,7 мкФ, ±10%, 50 В	1				
C35	CL05A225KA5NUNC - Samsung, 2,2 мкФ, ±10%, 50 В	1				
C36	CL05A105KA5NQNC - Samsung, 1 мкФ, ±10%, 50 В	1				
C37	CL21A106KBYQNE - Samsung, 10 мкФ, ±10%, 50 В	1				
C38, C39	CL21B105KBFNNNG - Samsung, 1 мкФ, ±10%, 50 В	2				
C40	CL05A225KA5NUNC - Samsung, 2,7 мкФ, ±10%, 50 В	1				
C41	CL05A225KA5NUNC - Samsung, 2,2 мкФ, ±10%, 50 В	1				
C42	CL05A105KA5NQNC - Samsung, 1 мкФ, ±10%, 50 В	1				
C43	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	1				
C44	CL05B103KB5NNNC - Samsung, 10 нФ, ±10%, 50 В	1				
C45, C46	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	2				
C47	CC0402JRNPO9BN180 - Yageo, 18 нФ, ±5%, 50 В	1				
C48	CC0402KRX7R9BB121 - Yageo, 120 нФ, ±10%, 50 В	1				
C49	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	1				
C50	CL05B103KB5NNNC - Samsung, 10 нФ, ±10%, 50 В	1				
C51-52	CL05A104MP5NNNC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	2				
C53	CC0402JRNPO9BN180 - Yageo, 18 нФ, ±5%, 50 В	1				
C54	CC0402KRX7R9BB121 - Yageo, 120 нФ, ±10%, 50 В	1				
C55, C56	CL05A105KA5NQNC - Samsung, 1 мкФ, ±10%, 50 В	2				
C57, C58	CC0402JRNPO9BN100 - Yageo, 10 нФ, ±5%, 50 В	2				
C59, C60	GRM0335C1H2R3WA01 - Murata, 2,3 нФ, ±2%, 50 В	2				
C61, C62	CL10A475KA8NQNC - Samsung, 4,7 мкФ, ±10%, 25 В	2				
C63	CL10B104KB8NNWC - Samsung, 100 нФ, ±10%, 50 В	1				
C64	CC0402JRNPO9BN180 - Yageo, 18 нФ, ±5%, 50 В	1				
C65, C66	GRM0335C1H1R6WA01 - Murata, 1,6 нФ, ±2%, 50 В	2				
C67	GJM0335C1E180GB01 - Murata, 18 нФ, ±2%, 25 В	1				
C68	CC0402JRNPO9BN180 - Yageo, 18 нФ, ±5%, 50 В	1				
C69	GJM0335C1E180GB01 - Murata, 18 нФ, ±2%, 25 В	1				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	PI81.464461.001 ПЕ	Лист
						2

[illegible]

Позн.	Найменування	Кіл.	Прим.																		
R5	RK73B1JT121J - KOA Speer, 120 Ом, ±5%, 0,125 Вт	1																			
R6	RK73B1JT470J - KOA Speer, 47 Ом, ±5%, 0,125 Вт	1																			
R7	RMCF0402JT10K0 - Stackpole Electronics, 10 кОм, ±5%, 0,125 Вт	1																			
VD1	PRTR5V0U2X - Nexperia, TVS-діод, 5,5 В, SOT-143B	1																			
VD2	MBR1020VL - ONSEMI, діод Шоттки, 20 В, 2 А, SOD123F	1																			
<u>Антени</u>																					
WA1, WA2	73412-0110 - Molex 2–6 ГГц, 50 Ом	2																			
<u>Роз'єми</u>																					
X1	USB 2.0 Type-B Micro – Molex, комбінований роз'єм	1																			
X2	Друкований, SWD-JTAG, комбінований роз'єм, 10 контактів	1																			
X3	OQ0832510000G - AMPHENOL ANYTEK, сигнальний, 8 контактів	1																			
X4	OQ0232510000G - AMPHENOL ANYTEK, сигнальний, 2 контакти	1																			
X5	OQ0432510000G - AMPHENOL ANYTEK, сигнальний, 4 контакти	1																			
X6	OQ0232510000G - AMPHENOL ANYTEK, живлення, 2 контакти	1																			
Z1, Z2	LFCN-2250+ - Mini-Circuits, ФНЧ, 2575 МГц, 50 Ом	2																			
<u>Кварцові резонатори</u>																					
ZQ1	ABM8G-12.000MHZ-18-D2Y-T3 - Abracon, 12МГц, 18 пФ	1																			
ZQ2, ZQ3	8Y39072002 - TXC, 39МГц, 10 пФ	2																			
<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td rowspan="3">PI81.464461.001 ПЕ</td><td>Лист</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>4</td></tr><tr><td>Зм.</td><td>Лист</td><td>№ докум.</td><td>Підп.</td><td>Дата</td></tr></table>									PI81.464461.001 ПЕ	Лист						4	Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
					PI81.464461.001 ПЕ	Лист															
						4															
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата																	

ДОДАТОК Д. СПЕЦИФІКАЦІЯ НА ПРИСТРІЙ

[illegible]

ДОДАТОК Є. СПЕЦИФІКАЦІЯ НА ДРУКОВАНИЙ ВУЗОЛ

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
				<u>Документація</u>		
A3			PI81.464461.002 СК	Складальний кресленик		
			PI81.464461.001 ЕЗ	Схема електрична принципова		
A4			PI81.464461.001 ПЕ	Перелік елементів		
				<u>Деталі</u>		
A3			PI81.758724.001	Друкована плата	1	
				<u>Інші вироби</u>		
				Антенна Molex 73412-0110	2	WA1, WA2
				Діод PRTR5V0U2X	1	VD1
				Діод Шоттки MBR1020VL	1	VD2
				Кварцовий резонатор АВМ8G	1	ZQ1
				Кварцовий резонатор 8Y39072002	2	ZQ2, ZQ3
				Конденсатор 10 мкФ, ±10%, 50 В	1	C1
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	1	C2
				Конденсатор 10 мкФ, ±10%, 50 В	3	C3-C5
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	1	C6, C7

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
				Конденсатор 10 нФ, ±10%, 50 В	2	C8, C9
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	2	C10, C11
				Конденсатор 18 нФ, ±5%, 50 В	1	C12
				Конденсатор 10 мкФ, ±10%, 50 В	1	C13
				Конденсатор 10 нФ, ±10%, 50 В	2	C14, C15
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	2	C16, C17
				Конденсатор 10 нФ, ±10%, 50 В	2	C18, C19
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	1	C20
				Конденсатор 18 нФ, ±5%, 50 В	1	C21
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	2	C22, C23
				Конденсатор 10 мкФ, ±10%, 50 В	2	C24, C25
				Конденсатор 1 мкФ, ±10%, 50 В	1	C26
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	1	C27
				Конденсатор 1 мкФ, ±10%, 50 В	1	C28
				Конденсатор 10 мкФ, ±10%, 50 В	2	C29, C30
				Конденсатор 10 мкФ, ±10%, 50 В	1	C31
				Конденсатор 1 мкФ, ±10%, 50 В	2	C32, C33
				Конденсатор 2,7 мкФ, ±10%, 50 В	1	C34
				Конденсатор 2,2 мкФ, ±10%, 50 В	1	C35
				Конденсатор 1 мкФ, ±10%, 50 В	1	C36
				Конденсатор 10 мкФ, ±10%, 50 В	1	C37
				Конденсатор 1 мкФ, ±10%, 50 В	2	C38, C39
				Конденсатор 2,7 мкФ, ±10%, 50 В	1	C40
				Конденсатор 2,2 мкФ, ±10%, 50 В	1	C41
				Конденсатор 1 мкФ, ±10%, 50 В	1	C42
				PI81.464461.002 СП		2
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	1	C43
				Конденсатор 10 нФ, ±10%, 50 В	1	C44
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	2	C45, C46
				Конденсатор 18 нФ, ±5%, 50 В	1	C47
				Конденсатор 120 нФ, ±10%, 50 В	1	C48
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	1	C49
				Конденсатор 10 нФ, ±10%, 50 В	1	C50
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	2	C51-52
				Конденсатор 18 нФ, ±5%, 50 В	1	C53
				Конденсатор 120 нФ, ±10%, 50 В	1	C54
				Конденсатор Samsung, 1 мкФ, ±10%, 50 В	2	C55, C56
				Конденсатор 10 нФ, ±5%, 50 В	2	C57, C58
				Конденсатор 2,3 нФ, ±2%, 50 В	2	C59, C60
				Конденсатор 4,7 мкФ, ±10%, 25 В	2	C61, C62
				Конденсатор 100 нФ, ±10%, 50 В	1	C63
				Конденсатор 18 нФ, ±5%, 50 В	1	C64
				Конденсатор 1,6 нФ, ±2%, 50 В	2	C65, C66
				Конденсатор 18 нФ, ±2%, 25 В	1	C67
				Конденсатор 18 нФ, ±5%, 50 В	1	C68
				Конденсатор 18 нФ, ±2%, 25 В	1	C69
				Ферит 2 А, 26 Ом / 100 МГц	2	L1, L2
				Ферит 2 А, 120 Ом / 100 МГц	7	L3-L9
				Ферит 2 А, 26 Ом / 100 МГц	1	L10
				Ферит 0,2 А, 70 Ом / 100 МГц	4	L11-L14
				Котушка 2,5 нГн, ±2% 0,8 А	2	L15, L16
				PI81.464461.002 СП		3
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
				Котушка 1,7 нГн, $\pm 2\%$ 0,8 А	2	L17, L18
				Ферит 2 А, 26 Ом / 100 МГц	2	L19, L20
				Мікросхема LT1965EMS8E-3.3#PBF	1	DD1
				Мікросхема LPC1549JBD48QL	1	DD2
				Мікросхема ADM7150ACPZ-5.0-R7	1	DD3
				Мікросхема EFR32MG24B020F1536IM40-B	2	DD4, DD5
				Мікросхема TQM879006A	1	DD6
				Резистор 68 Ом, $\pm 5\%$, 0,125 Вт	1	R1
				Резистор 10 кОм, $\pm 5\%$, 0,125 Вт	2	R2, R3
				Резистор 150 Ом, $\pm 5\%$, 0,125 Вт	1	R4
				Резистор 120 Ом, $\pm 5\%$, 0,125 Вт	1	R5
				Резистор 47 Ом, $\pm 5\%$, 0,125 Вт	1	R6
				Резистор 10 кОм, $\pm 5\%$, 0,125 Вт	1	R7
				Роз'єм USB 2.0 Type-B Micro	1	X1
				Роз'єм друкований SWD-JTAG	1	X2
				Роз'єм OQ0832510000G	1	X3
				Роз'єм OQ0232510000G	1	X4
				Роз'єм OQ0432510000G	1	X5
				Роз'єм OQ0232510000G	1	X6
				Світлодіод LTST-C190KGKT	1	HL1
				Світлодіод 19-213SUBC/S400-A5	1	HL2
				Світлодіод SML-D12U1WT86	1	HL3
				Фільтр нижніх частот LFCN-2250+	2	Z1, Z2
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	PI81.464461.002 СП	
					4	

[illegible]