

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

До захисту допущено:

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньою програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки», за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: Бортова підсистема міжсупутникового зв'язку наносупутника

Виконав:

студент IV курсу, групи РЕ-21

Яковенко Дмитро Олексійович

Прізвище, ім'я, по батькові

Керівник:

доцент, к.т.н Антипенко Руслан Володимирович

Посада, науковий ступінь, вчене звання

Прізвище, ім'я, по батькові

Рецензент:

доцент, к.т.н Пільтяй Степан Іванович

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові

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

Студент (-ка) _____

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	PE21.468343.001.T3	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	PE21.468343. 001 ПЗ	Пояснювальна записка	55	
3	A4	PE21.468343. 001E1	Схема структурна	1	
4	A4	PE21.468343.001 E3	Схема електрична принципова	1	
5	A4	PE21.468343.001ПЕ	Перелік елементів	1	
6	A4	PE21.468343.001 СК	Складальний кресленик друкованої плати	1	
7	A4	PE21.758724.001	Друкована плата	2	
8	A4		Технологічні файли друкованої плати	5	

				PE21.468343.001		
	ПБ	Підп.	Дата	Бортова підсистема міжсупутникового зв'язку наносупутника	Лист	Листів
Розробн.	Яковенко Д.О.					1
Керівн.	Антипенко Р.В.				КП ім. Ігоря Сікорського Каф.ПРЕ Гр. PE-21	
Н/контр.						
Зав.каф.	Мовчанюк А.В.					

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт складається з пояснювальної записки, яка включає в себе 55 сторінок, містить 58 рисунків, 5 таблиць, 7 додатків (2 креслень, схему електричну принципову, перелік елементів та технологічні файли для виготовлення друкованої плати) та 18 джерел.

Мета проєкту — розробка радіочастотного модуля бортової підсистеми міжсупутникового зв'язку для нестабілізованих наносупутників, що працюють у складі сузір'я супутників формату CubeSat, призначеного для забезпечення надійного каналу зв'язку на частотах 5,15–5,85 ГГц.

Об'єкт проєктування — RF Front-End модуль, що складається з смугового мікросмужкового фільтра, малошумного підсилювача, підсилювача потужності та вбудованого комутатора.

Основні результати роботи:

- розроблено смуговий фільтр 5-го порядку на мікросмужкових резонаторах із характеристиками: смуга пропускання 5,15–5,925 ГГц на рівні – 4 дБ, зворотні втрати не гірше –10 дБ.
- обрано та обґрунтовано вибір Front-End модуля QPF4506B, що забезпечує підсилення 30 дБ у режимі передачі та 13,5 дБ у режимі приймання з коефіцієнтом шуму 1,7 дБ.
- розроблено друковану плату габаритами 30×50 мм на в ламінаті Rogers RO4350B, що забезпечує стабільність параметрів у робочому діапазоні та можливість міжплатного з'єднання з антеною.

Новизна роботи полягає у застосуванні шестигранної антенної будови для наносупутника формату CubeSat, за якої на кожній з шести граней супутника розміщується окремий радіочастотний модуль із власною антеною. Такий підхід забезпечує всепрямоване покриття та стабільний міжсупутниковий зв'язок незалежно від взаємної орієнтації апаратів у сузір'ї, оскільки в будь-який момент часу принаймні один із модулів має сприятливу орієнтацію для встановлення каналу зв'язку.

Ключові слова: наносупутник, CubeSat, міжсупутниковий зв'язок, RF Front-End, смуговий фільтр, мікросмужкова лінія, електромагнітний аналіз, QPF4506B, Rogers RO4350B, друкована плата, AWR Design Environment.

ANNOTATION

The thesis consists of an explanatory note comprising 55 pages, including 58 figures, 5 tables, 7 appendices (2 drawings, an electrical schematic diagram, a bill of materials, and manufacturing files for printed circuit board fabrication), and 18 references.

The goal of the project is to develop a radio-frequency module for the onboard subsystem of an inter-satellite communication system for a CubeSat nanosatellite, intended to provide a reliable communication link in the 5.15–5.85 GHz frequency range.

The object of design is an RF Front-End module consisting of a microstrip band-pass filter, a low-noise amplifier, a power amplifier, and an integrated switch.

Main results of the work:

- a 5th-order microstrip resonator band-pass filter was developed with the following characteristics: passband 5.15–5.925 GHz, return loss not worse than –10 dB, and passband ripple not exceeding 4 dB.
- the QPF4506B Front-End module was selected and justified, providing 30 dB gain in transmit mode and 13.5 dB gain in receive mode with a noise figure of 1.7 dB.
- a printed circuit board with dimensions 30×50 mm was designed on Rogers RO4350B laminate, ensuring stable performance over the operating frequency range and enabling inter-board connection with the antenna.

The scientific novelty of the work lies in the application of a hexagonal antenna architecture for a CubeSat nanosatellite, in which each of the six faces of the satellite hosts a separate RF module with its own antenna. This approach provides omnidirectional coverage and stable inter-satellite communication regardless of the relative orientation of the spacecraft in a constellation, since at any moment at least one module has a favorable orientation for establishing a communication link.

Keywords: nanosatellite, CubeSat, inter-satellite communication, RF Front-End, band-pass filter, microstrip line, electromagnetic analysis, QPF4506B, Rogers RO4350B, printed circuit board, AWR Design Environment.

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Бортова підсистема міжсупутникового зв'язку
наносупутника»**

Київ — 2026 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»

Освітня програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студента

Яковенка Дмитра Олексійович

1. Тема проєкту «Бортова підсистема міжсупутникового зв'язку наносупутника»

2. Керівник проєкту Антипенко Руслан Володимирович, затверджені наказом по університету від « 29 » травня 2026 р. №1989-с

Строк подання студентом проєкту 08 червня 2026 року

3. Вихідні дані до проєкту: Напруга живлення від +5В, струм живлення у режимі передачі до 400 мА, струм живлення у режимі приймання: до 100 мА, діапазон робочих частот 5,15 ГГц – 5,85 ГГц, підсилення у режимі передачі: більше 25 дБ, піддсилення у режимі приймання: більше 10 дБ, узгодження всіх радіочастотних трактів забезпечити на хвильовий опір 50 Ом. Роз'єми: SSMCX Jack та 2 SMP-MAX Jack.

4. Зміст пояснювальної записки 1) Огляд існуючих рішень, 2) Аналіз технічного завдання та побудова структурної схеми комунікаційної системи міжсупутникового зв'язку наносупутника 3) Вибір елементної бази 4) Розробка фільтру 5) Розробка схеми електричної принципової та друкованої плати

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Схема електрична принципова, структурна схема, складальний кресленик плати, складальний кресленик пристрою, презентація сторінок.

6. Дата видачі завдання 14 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	14.04.26-06.05.26	
2	Розробка та аналіз завдання на проєкт	07.05.26-10.05.26	
3	Розробка функціональної схеми та вибір компонентів	11.05.26-18.05.26	
4	Розробка схеми електричної принципової	19.05.26-23.05.26	
5	Розробка друкованої плати	24.05.26-29.05.26	
6	Розробка конструкторської документації	30.05.26-05.06.26	
7	Оформлення текстової та графічної документації	06.06.26-08.06.26	

Студент

Яковенко Дмитро Олексійович

Керівник:

Антипенко Руслан Володимирович

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	4
Огляд існуючих рішень	5
1.1 GOMSpase Nanocom Link S (трансивер S діапазону).....	5
1.2 GOMSpase NanoCom AX2150 (трансивер S діапазону).....	5
1.3 IQ Spacocom X Link-X (SDR X-діапазонний трансивер)	6
1.4 Висновок до огляду.....	7
2 Аналіз технічного завдання та побудова структурної схеми комунікаційної системи міжсупутникового зв'язку наносупутника.....	8
2.1 Аналіз технічного завдання	8
2.2 Структурна схема комунікаційної системи міжсупутникового зв'язку наносупутника	9
3 Вибір елементної бази	11
3.1 Вибір FEM.....	11
3.2 Вибір компонентів до FEM QPF4506B.....	13
4 Розробка фільтру	15
4.1 Вибір матеріалу друкованої плати	16
4.2 Обрахунок фільтру за допомогою онлайн калькулятора	18
4.3 Проектування фільтру у AWR Design Environment	20
4.3.1 Задання параметрів та первинний обрахунок фільтру.....	20
4.3.2 Оптимізація фільтру	25
4.3.3 Електромагнітний аналіз та подальша оптимізація фільтру ...	28
5 Розробка схеми електричної принципової та друкованої плати.....	34
5.1 Розрахунок мінімальної площі ДП.....	35
5.2 Визначення можливостей виробника РСВ.....	35
5.3 Розрахунок ширини провідника	36

					<i>PE21.468343.001 ПЗ</i>	Лис
						2
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

5.4 Створення бібліотеки символів та посадкових майданчиків елементів	38
5.5 Схема електрична принципова	43
5.6 Задання правил трасування плати	45
5.7 Проектування друкованої плати.....	47
5.8 Перевірка на помилки трасування	50
Висновки	52
Перелік джерел посилань	54
Додаток А. Технічне завдання.....	2
Додаток Б. Структурна схема	2
Додаток В. Принципова електрична схема	2
Додаток Г. Перелік елементів.....	2
Додаток Д. Технологічні файли друкованої плати.....	2
Додаток Е. Кресленик друкованої плати	2
Додаток Є. Складальний кресленик друкованої плати.....	2
Додаток Ж.....	2

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

LEO — low Earth orbits

BPSK — Binary Phase Shift Keying

QPSK — Quadrature Phase-Shift Keying

GMSK — Gaussian Minimum Shift Keying

RF — radio frequency

LNA — low noise amplifier

PA — power amplifier

FEM — front end module

IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers

TX — transmitter

RX — receiver

NF — noise figure

КСХ — коефіцієнт стоячої хвилі

ЕМ — електромагнітний

PCB — printed circuit board

Footprint — посадковий майданчик

SMD — Surface-Mount Device

					РЕ21.468343.001 ПЗ	Лис
						4
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 GOMSpace Nanocom Link S (трансивер S діапазону)

NanoCom Link S — це високошвидкісний S-діапазонний трансивер компанії GomSpace, призначений для супутникових місій. Він забезпечує надійний двосторонній зв'язок із швидкістю передачі даних до 7,5 Мбіт/с.



Рисунок 1.1 — NanoCom Link S

Модуль встановлюється на борту супутника та забезпечує двосторонній обмін даними з наземною станцією без використання супутників-ретрансляторів. Він підтримує одночасний прийом і передачу даних, що дозволяє організувати безперервний канал зв'язку.

Пристрій підтримує модуляції BPSK та QPSK, а максимальна вихідна потужність передавача становить 32 дБм. Робочий діапазон частот для передачі даних становить 2200–2290 МГц, а для прийому — 2025–2110 МГц. Антена має робочу смугу частот 265 МГц та використовує правокругову поляризацію, що забезпечує ефективну роботу в супутникових системах зв'язку, максимальний коефіцієнт підсилення антени становить 7 дБі.

Напруга живлення модуля знаходиться в межах 8–18 В, а споживана потужність не перевищує 15 Вт.

1.2 GOMSpace NanoCom AX2150 (трансивер S діапазону)

NanoCom AX2150 — компактний напівдуплексний S-діапазонний радіотрансивер для телеметрії та телекомандування малих супутників.

Передавач має регульовану вихідну потужність у межах 20–700 мВт.

					РЕ21.468343.001 ПЗ	Лис
						5
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

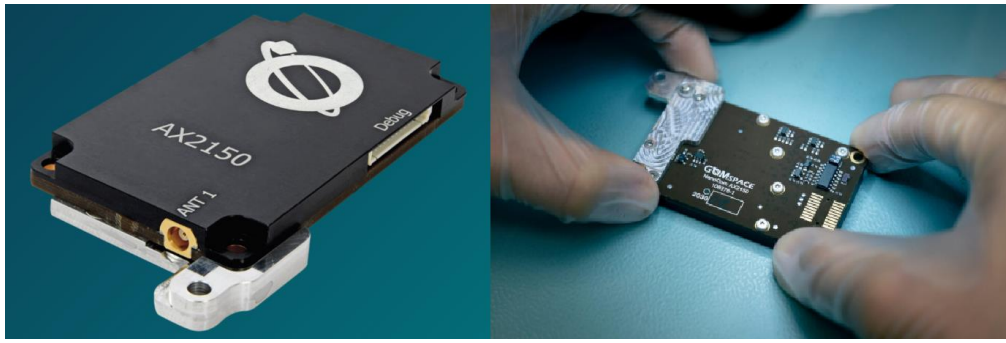


Рисунок 1.2 — NanoCom AX2150

Модуль працює в діапазоні 2025–2110 МГц для прийому та 2200–2290 МГц для передачі зі швидкістю передачі даних від 2,4 до 96 кбіт/с. Підтримується модуляція GMSK.

1.3 IQ Spacocom X Link-X (SDR X-діапазонний трансивер)

XLink-X — це програмно-визначуваний радіотрансивер, призначений для організації високошвидкісних X-діапазонних каналів зв'язку малих супутників у LEO-орбіті. Пристрій забезпечує двонаправлений зв'язок.



Рисунок 1.3 — Spacocom X Link-X

Система підтримує надвисокошвидкісну передачу даних із супутника на Землю зі швидкістю до 200 Мбіт/с, а з Землі наносупутник не менше — 56 кбіт/с. Робочі частоти становлять 7145–7250 МГц на прийом та 8025–8400 МГц на передачу, з додатковою підтримкою S-діапазонного приймача в діапазоні 2025–2110 МГц.

Пристрій підтримує модуляції BPSK, QPSK та вищі порядки модуляції. Вихідна потужність передавача становить до +30 дБм.

Споживана потужність становить до 16 Вт, а живлення підтримується в діапазоні 6–18 В або 28 В.

					PE21.468343.001 ПЗ	Лис
						6
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4 Висновок до огляду

Проведений аналіз існуючих радіочастотних модулів показав, що сучасні супутникові трансивери S- та X-діапазонів орієнтовані переважно на забезпечення зв'язку між космічним апаратом і наземною станцією. Розглянуті модулі NanoCom Link S, NanoCom AX2150 та XLink-X підтримують різні швидкості передачі даних, типи модуляції та діапазони робочих частот, проте всі вони призначені для організації каналів телеметрії, телекомандування або високошвидкісної передачі інформації на Землю. Водночас їхня архітектура не орієнтована на побудову розподілених мереж міжсупутникового зв'язку, що потребують безпосереднього обміну даними між космічними апаратами. Це підтверджує актуальність розробки спеціалізованого радіочастотного модуля для міжсупутникового зв'язку наносупутників, здатного забезпечити обмін даними між елементами супутникового угруповання незалежно від наявності прямого зв'язку з наземними станціями.

					РЕ21.468343.001 ПЗ	Лис
						7
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ПОБУДОВА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ КОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МІЖСУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ НАНОСУПУТНИКА

2.1 Аналіз технічного завдання

Розроблювана у межах дипломного проєкту підсистема є радіочастотним модулем бортової системи міжсупутникового зв'язку нестабілізованого нано-супутника, що знаходиться у сузір'ї подібних його супутників. Вона призначена для забезпечення радіочастотного тракту між антеною та подальшим обробленням сигналу. Система виконує функції підсилення сигналів у напрямку передачі та приймання, а також узгодження імпедансів (50 Ом) між антенною і трансивером.

Згідно з технічним завданням, система працює в діапазоні частот 5,15–5,85 ГГц, що належить до високочастотного С-діапазону.

Живлення модуля здійснюється від напруги 5 В, що є типовим значенням, при цьому споживання становить до 400 мА у режимі передачі та до 100 мА у режимі приймання. Вимоги до підсилення передбачають коефіцієнт підсилення у тракті передачі більше 25 дБ, у тракті приймання більше 10 дБ, а також вихідну потужність понад 20 дБм, що є типовими значеннями для компактних RF front-end модулів.

У складі RF тракту використовується смуговий фільтр, який забезпечує селекцію корисного сигналу в діапазоні 5,15–5,85 ГГц та придушення позасмугових складових. Він повинен мати нерівномірність у смузі пропускання не гірше 4 дБ та зворотні втрати не більше –10 дБ у робочому діапазоні, а також забезпечувати узгодження з трактом 50 Ом.

Конструктивно передбачено використання високочастотних роз'ємів SSMCX для антенного інтерфейсу та SMP-MAX для підключення трактів приймання і передачі. Додатково передбачена можливість міжплатного з'єднання (board-to-board)(рисунок 2.1).

Обмеження габаритів плати до 100×100 мм є достатнім для реалізації повноцінного RF front-end тракту, однак потребує щільного компонування та мінімізації довжин високочастотних трас.

					<i>PE21.468343.001 ПЗ</i>	Лис
						8
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

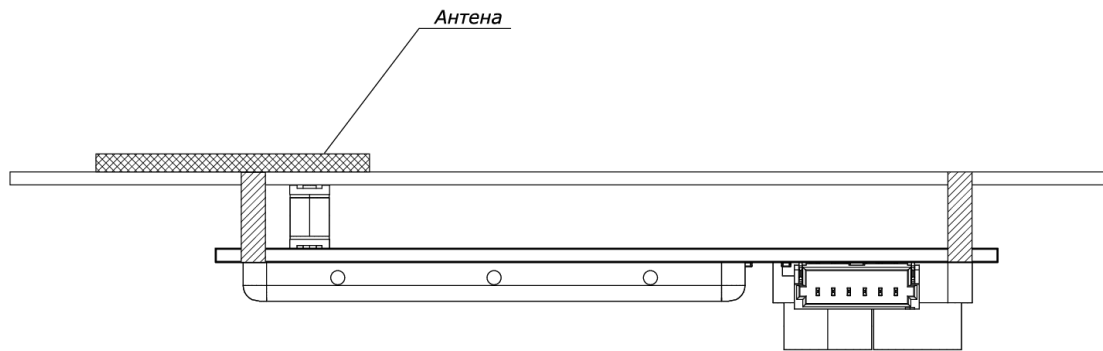


Рисунок 2.1 — Ескіз кріплення плати до антени

2.2 Структурна схема комунікаційної системи міжсупутникового зв'язку наносупутника

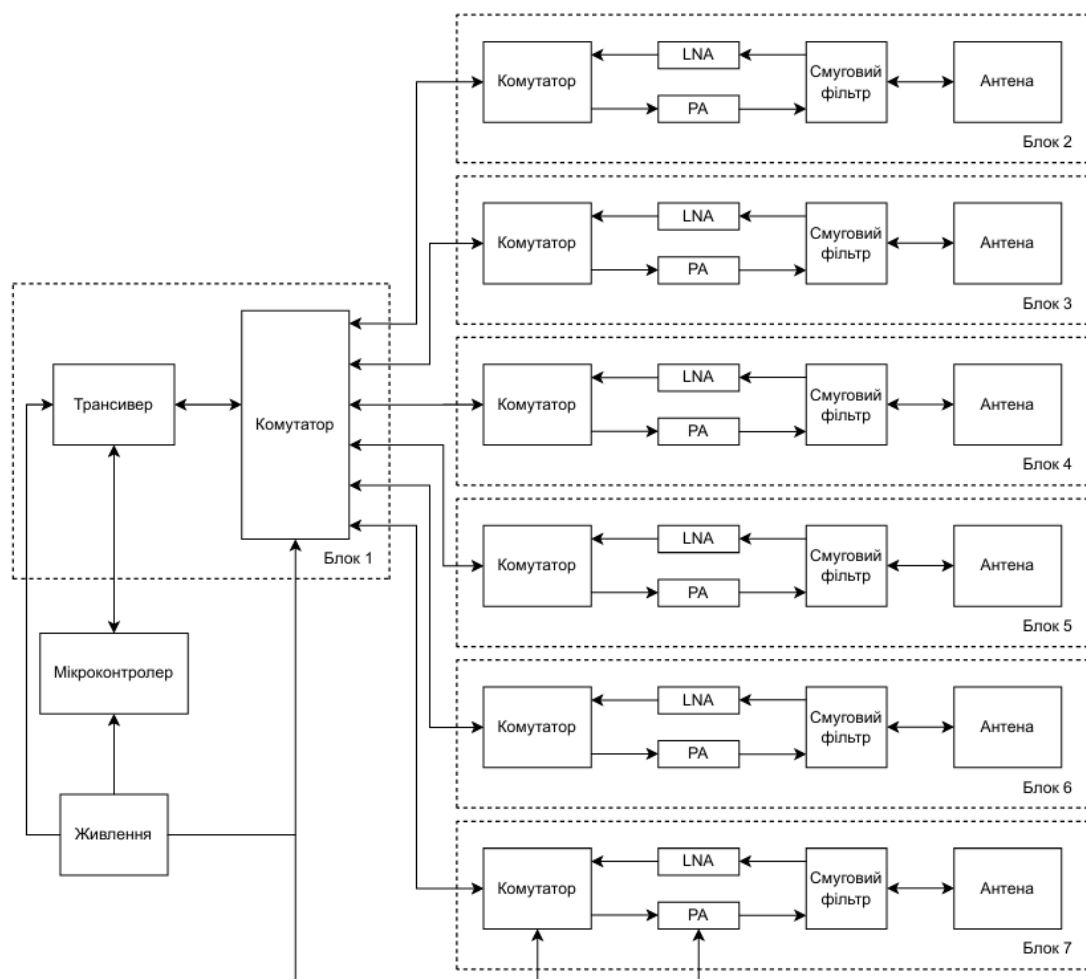


Рисунок 2.2 — Структурна схема комунікаційної системи міжсупутникового зв'язку наносупутника

Структурна схема комунікаційної системи міжсупутникового зв'язку наносупутника складається з центрального блока (Блок 1), який містить трансивер, центральний комутатор, мікроконтролер і систему живлення, а також

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468343.001 ПЗ

Лис
9

шести однакових радіочастотних модулів (Блоки 2–7), розташованих на кожній грані CubeSat.

Центральний блок відповідає за загальне керування системою. Трансивер займається формуванням, прийманням та опрацюванням сигналів для зв'язку між супутниками. Центральний комутатор спрямовує сигнали трансивера на один із шести радіочастотних модулів залежно від потреби. Мікроконтролер керує режимами роботи, перемиканням комутаторів і контролює стан підсистеми. Блок живлення забезпечує стабільними напругами всі модулі.

Оскільки наносупутник передбачається використовувати у складі сузір'я однотипних супутників, було прийнято рішення реалізувати шестигранну антенну архітектуру, за якої на кожній грані CubeSat розміщується окремий радіочастотний модуль. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільний радіозв'язок незалежно від взаємної орієнтації супутників у сузір'ї, оскільки в будь-який момент часу принаймні один із модулів матиме сприятливу орієнтацію для встановлення каналу зв'язку. Крім того, модульна архітектура підвищує надійність: якщо один канал виходить з ладу, зв'язок можна вести через інші радіочастотні модулі.

Водночас це не означає, що всі антени одночасно працюють у режимі прийому або передавання сигналу. Центральний мікроконтролер за спеціальним алгоритмом здійснює оцінювання радіообстановки та вибір оптимального радіочастотного модуля, з яким у конкретний момент часу встановлюється зв'язок. Таким чином забезпечується енергетична ефективність системи.

Кожен із блоків 2–7 має однакову будову: локальний комутатор, малошумлячий підсилювач, підсилювач потужності, смуговий фільтр та антену.

У режимі прийому сигнал з антени проходить крізь смуговий фільтр, який усуває завади за межами робочої смуги, потім підсилюється LNA для підвищення чутливості приймача, після чого через локальний комутатор потрапляє до центрального трансивера.

У режимі передачі сигнал від трансивера надходить через комутатори до відповідного модуля, підсилюється РА, проходить смуговий фільтр і випромінюється антеною у напрямку іншого супутника.

					<i>PE21.468343.001 ПЗ</i>	Лис
						10
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

3.1 Вибір FEM

Front End модуль (FEM) — це вузол бездротового зв'язку, що розташовується між антеною та трансивером. Зазвичай FEM об'єднує в одному корпусі кілька ключових функцій:

- підсилювач потужності (PA) — посилює вихідний сигнал для передачі на значні відстані.
- малошумний підсилювач (LNA) — підсилює слабкі вхідні сигнали під час прийому.
- комутатори — перемикають шлях сигналу між передачею (TX) та прийомом (RX).

Також модуль має бути узгодженим за імпедансом з трактом і антеною, зазвичай на хвильовий опір 50 Ом. Додатково FEM може містити смуговий фільтр, який виділяє потрібну смугу частот і пригнічує завади.

Таблиця 3.1 — Front End модулі

Назва	Ціна, €	NF, дБ	Підсилення LNA, дБ	Підсилення PA, дБ	Струм живлення, мА	Напруга живлення, В
QPB9850	17,03	1,1	High — 34; Low — 16,5	-	High - 90; Low - 54	5
QPF4506B	5,67	1,7	13,5	30	RX — 35; TX — 150 – 270	5
SKY85717-21	1,69	-	12	28	-	-
SE5007T	1,01 (від 3000 шт.)	2,5	12	30	RX — 15; TX — 195 - 220	3.3
QPF7552	11,32	3,5	12	31	-	5
QPF4657	4,74	1,9	High — 13,5, Mid — 4	31	20	5

Робочу частоту FEM, згідно з технічним завданням, обрано в С-діапазоні (за класифікацією IEEE).

QPB9850 працює від 2.3 до 5.0 ГГц. Його особливість — потужний комутатор, що витримує до 34 дБм у режимі передачі, проте вбудованого PA він не має. Містить двоступеневий LNA із підсиленням 34 дБ та чудовим $NF = 1.1$ дБ, а також режим байпасу, в якому струм і підсилення знижуються (до 16,5 дБ).

QPF4506B — FEM для Wi-Fi 6 з робочим діапазоном 5.15–5.925 ГГц. Включає PA, LNA та SP2T-комутатор. Коефіцієнт підсилення в режимі передачі — 30 дБ, у режимі приймання — 13,5 дБ, коефіцієнт шуму — 1,7 дБ. Оптимізований для напруги 5 В.

SKY85717-21 — для Wi-Fi 5, діапазон 5 ГГц. Містить PA, LNA з байпасом та SPDT-комутатор. Підсилення: 28 дБ у TX, 12 дБ у RX.

SE5007T — старіша модель для Wi-Fi 4, діапазон 4.9–5.85 ГГц. Інтегрує PA, LNA та комутатор. Його коефіцієнт підсилення у режимі передачі становить 30 дБ, а у режимі прийому — 13.5 дБ. Але його NF є доволі високим, у порівнянні з іншими — 2,5 дБ.

QPF7552 — Wi-Fi 6 FEM, діапазон 5.49–5.835 ГГц. Містить PA, LNA, фільтр та комутатор. Має вбудований фільтр із пригніченням позасмугових сигналів до 55 дБ. Недоліки: високий NF — 3,5 дБ

QPF4657 — найновіший модуль для Wi-Fi 7, діапазон 5.925–7.125 ГГц. Містить PA, LNA, фільтр та комутатор. Має три режими LNA: High Gain, Mid Gain, Bypass. У режимі High Gain підсилення становить 13,5 дБ, NF — 1,9 дБ. PA забезпечує підсилення 31 дБ.

Для наносупутника обрано FEM QPF4506B через оптимальний баланс між енергоспоживанням та радіочастотними параметрами. Низький коефіцієнт шуму (NF — 1,7 дБ) є важливим для чутливого прийому слабких сигналів. Коефіцієнти підсилення для прийому та передачі становлять 13,5 дБ та 30 дБ відповідно

					РЕ21.468343.001 ПЗ	Лис
						12
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

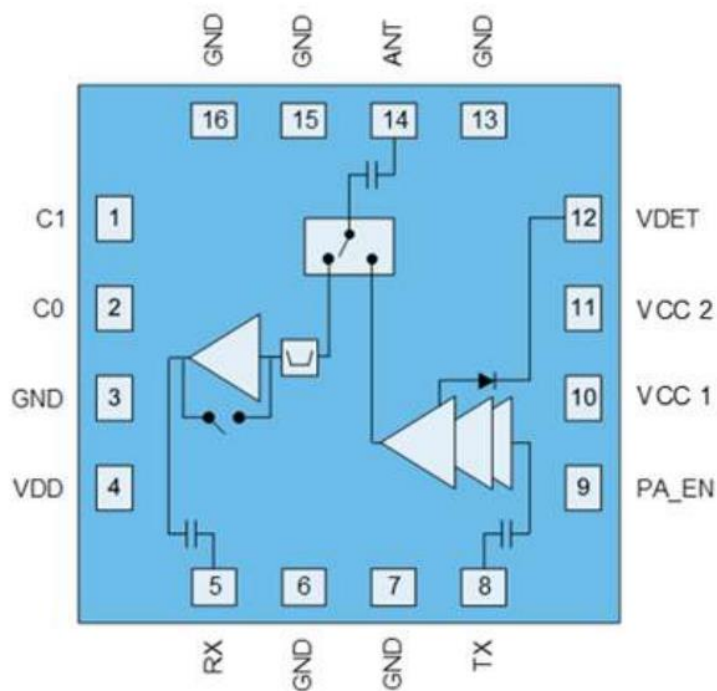
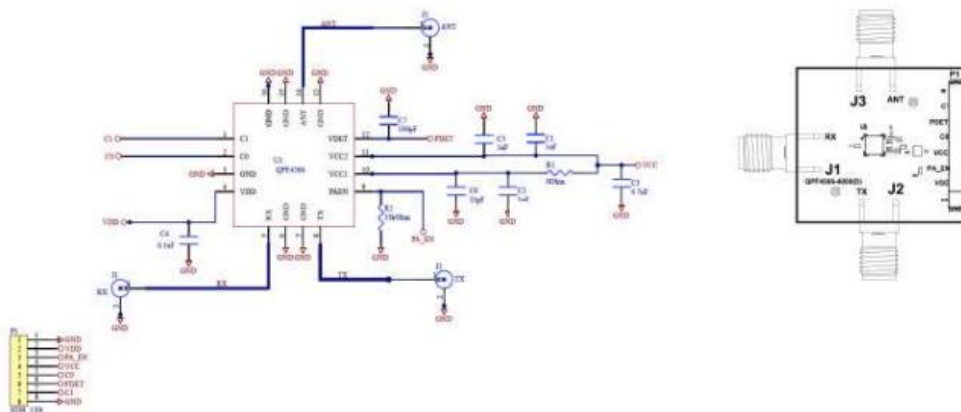


Рисунок 3.1 — Структурна схема FEM QPF4506B

QPF4506B — це FEM, який об'єднує підсилювач потужності для передачі, малошумний підсилювач для прийому та електронний для комутації цих трактів на спільну антену. Прийомний тракт може працювати як з підсиленням сигналу, так і в обхідному режимі. Додатково модуль має вбудований детектор, який вимірює вихідну потужність і допомагає контролювати її рівень. Всі режими роботи обираються за допомогою трьох керуючих сигналів.

3.2 Вибір компонентів до FEM QPF4506B

У даташиті до модуля вказана схема підключення (evaluation board) (рисунок 3.2) даного модуля та вказаний список елементів, що необхідні для його роботи. На базі схеми та переліку елементів створено таблицю елементів (таблиця 2.2) для обв'язки даного модуля.



Ref. Des.	Value	Description	Manuf.	Part number
-	-	Printed Circuit Board		
U1	-	5GHz Wi-Fi Front End Module	Qorvo	QPF4506B
C3	4.7μF	CAP, 10%, 16V, X7R, 0805	Murata	GRM21BR71C475KA73L
C1,C2	1μF	CAP, 20%, 6.3V, X5R, 0201	Murata	GRM033R60J105MEA2D
C4	0.1μF	CAP, 10%, 16V, X5R, 0201	Murata	GRM155R71C104KA88D
C5	1,000pF	CAP, 10%, 50V, X7R, 0201		
C7	100pF	CAP, 5%, 25V, C0G, 0201		
C6	33pF	CAP, 5%, 25V, C0G, 0201		
R1	0Ω	Resistor, Chip, 5%, 1/10W, 0402	Kamaya	RMC1/16SJPTH
R2	33,000Ω	Resistor, Chip, 5%, 1/16W, 0402	Kamaya	RMC1/16S-333JTH

Рисунок 3.2 — Схема підключення FEM та перелік елементів

Таблиця 2.2 — Обв'язка для QPF4506B

Назва	Значення	Опис	Виробник
GCM21BM8EH475KE08L	4,7 мкФ	MLCC SMD/SMT 0805 50VDC 4.7uF 10% X8M AEC-Q200	Murata Electronics
GRM033R61C105ME15D	1 мкФ	MLCC - SMD/SMT 1 uF 16 VDC 20% 0201 X5R	Murata Electronics
GRT033C81C104KE01J	0,1 мкФ	MLCC - SMD/SMT 0.1 uF 16 VDC 10% 0201 X6S AEC-Q200	Murata Electronics
GRM0335C1H102GE01D	1000 пФ	MLCC - SMD/SMT 1000 pF 50 VDC 2% 0201 C0G (NP0)	Murata Electronics
GRM0335C1E101FA01D	100 пФ	MLCC - SMD/SMT 100 pF 25 VDC 1% 0201 C0G (NP0)	Murata Electronics
GRM0335C1E330FA01D	33 пФ	MLCC - SMD/SMT 33 pF 25 VDC 1% 0201 C0G (NP0)	Murata Electronics
RCG040233K0JNED	33 кОм	Thick Film Resistors - SMD .063watt 33kohms 5% 0402 200ppm	Vishay / Draloric

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468343.001 ПЗ

Лис

14

4 РОЗРОБКА ФІЛЬТРУ

Фільтри — це електронні пристрої, які пропускають сигнали потрібного діапазону частот та пригнічують небажані сигнали й шуми. Вони є важливою частиною систем радіозв'язку, оскільки забезпечують розділення каналів, зменшення завад та покращення якості передачі сигналу. Основними типами фільтрів є фільтри низьких, високих, смугових та загороджувальних частот.

Мікросмужкові фільтри — це НВЧ-фільтри, виконані у вигляді провідних смужок на діелектричній підкладці друкованої плати. Мікросмужка — це тип лінії зв'язку, яку можна виготовити за допомогою будь-якої технології, де провідник відділений від заземленої площини діелектричним шаром, відомим як підкладка.

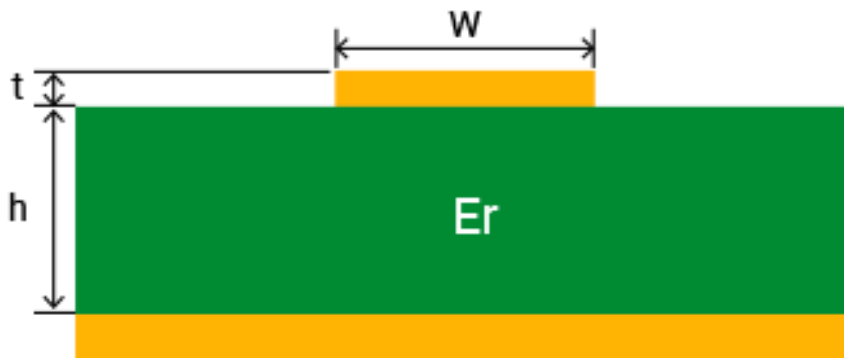


Рисунок 4.1 — Поперечний переріз мікросмужкової лінії

Наближено хвильовий опір мікросмужкової лінії можна розрахувати за формулою:

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \times \ln \left(\frac{5,98h}{0,8W + t} \right)$$

де ϵ_r — діелектрична проникність підкладки;

h — товщина діелектричного шару;

W — ширина провідника;

t — товщина провідника.

На відміну від дискретних фільтрів (на окремих компонентах), мікросмужкові фільтри значно краще пристосовані для роботи на високих частотах. У НВЧ-діапазоні звичайні конденсатори та котушки індуктивності починають вносити паразитні ємності, індуктивності та додаткові втрати, що спотворює

					РЕ21.468343.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		15

характеристику фільтра. Мікросмужкові ж фільтри створені саме для таких частот — вони забезпечують стабільніші параметри та менше послаблюють корисний сигнал. Додатковими перевагами є малі габарити, невелика вага та можливість безпосереднього вбудовування в друковану плату без великої кількості окремих елементів.

4.1 Вибір матеріалу друкованої плати

Для проектування високочастотних трактів доцільно застосовувати спеціалізовані НВЧ-діелектрики, зокрема матеріали типу Rogers, які мають стабільні та передбачувані електричні властивості на високих частотах.

Найбільш критичним параметром для НВЧ-лат є тангенс діелектричних втрат, який визначає величину енергетичних втрат сигналу в підкладці. У матеріалів Rogers він перебуває в межах приблизно 0,002–0,004, що забезпечує низькі втрати та ефективну передачу сигналу.

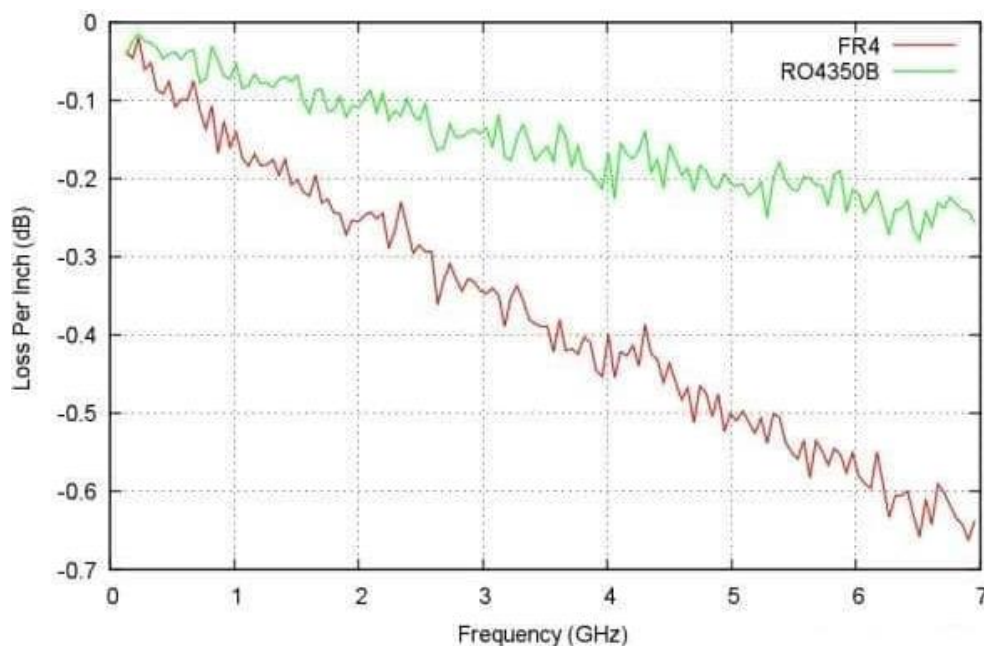


Рисунок 4.1 — Залежність енергетичних втрат від частоти

Ще однією перевагою матеріалів Rogers є висока стабільність діелектричної проникності. Вона майже не залежить від частоти, температури чи вологості. Наприклад, у FR4 діелектрична проникність може суттєво змінюватися від партії до партії.

Property	Typical Value	
	RO4003C	RO4350B
Dielectric Constant, ϵ_r Process	3.38 ± 0.05	⁽¹⁾ 3.48 ± 0.05
⁽²⁾ Dielectric Constant, ϵ_r Design	3.55	3.66
Dissipation Factor tan, d	0.0027 0.0021	0.0037 0.0031

Рисунок 4.4 — Діелектрична проникність та тангенс кута втрат для Rogers

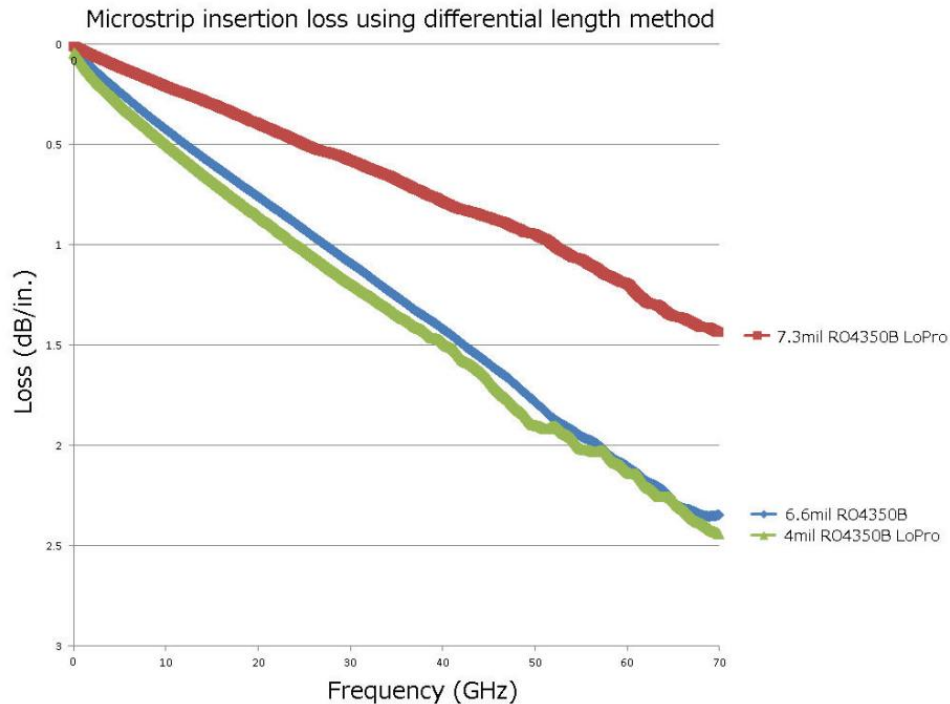


Рисунок 4.5 — Залежність втрат від товщини діелектрику та від частоти

У цьому проєкті для створення високочастотних мікросмушкових ліній та інших елементів НВЧ-тракту обрано матеріал Rogers RO4350B. Цей вибір зумовлений оптимальним співвідношенням між високочастотними характеристиками, стабільністю параметрів і вартістю порівняно з іншими матеріалами серії Rogers.

Тоді плата буде мати наступні параметри:

- товщина діелектрику: 0,76 мм;
- матеріал діелектрику: RO4350B;
- товщина провідника: 1 oz = 35 мкм.

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468343.001 ПЗ

Лис
17

Standard Thicknesses	Standard Panel Sizes	Standard Claddings
RO4003C: 0.008" (0.203mm) +/- 0.0010" 0.012" (0.305mm) +/- 0.0010" 0.016" (0.406mm) +/- 0.0015" 0.020" (0.508mm) +/- 0.0015" 0.032" (0.813mm) +/- 0.0020" 0.060" (1.524mm) +/- 0.0040" RO4350B: 0.004" (0.10mm) +/- 0.0007" 0.0066" (0.17mm) +/- 0.0007" 0.010" (0.25mm) +/- 0.0010" 0.020" (0.51mm) +/- 0.0015" 0.030" (0.76mm) +/- 0.0020" 0.060" (1.52mm) +/- 0.0040"	24" X 18" (610 X 457 mm) 24" X 21" (610 X 533 mm) 24" X 36" (610 X 915 mm) 48" X 36" (1219 X 915 mm) *Additional panel sizes available	<u>Electrodeposited Copper Foil</u> ½ oz. (18µm) HH/HH 1 oz. (35µm) H1/H1 *Additional cladding weights are available

Рисунок 4.6 — Стандартні параметри для RO4350B

4.2 Обрахунок фільтру за допомогою онлайн калькулятора

З метою первинного аналізу та попереднього проектування смугового фільтра із заданими частотними характеристиками було проведено моделювання з використанням онлайн-калькулятора для розрахунку мікросмужкових фільтрів. Цей етап дозволив швидко оцінити принципову можливість реалізації фільтра з необхідними параметрами.

Обрана модель фільтру — Interdigital, складається з щільно розташованих вертикально орієнтованих резонаторів, завдяки чому мають суттєву перевагу за габаритами порівняно з більшістю інших мікрохвильових фільтрів.

Резонатори мають фіксовану електричну довжину — чверть хвилі. Один їх кінець є розімкненим, а інший — короткозамкненим. У мікросмужкових структурах коротке замикання реалізується за допомогою металізованих перехідних отворів.

Параметри фільтра та характеристики підкладки наведені на рисунку 4.7. Розрахований фільтр являє собою смуговий фільтр п'ятого порядку Чебишова з пульсаціями 0,01 дБ у смузі пропускання. Смуга пропускання становить від 5,15 ГГц до 5,925 ГГц.

Отримана в результаті моделювання топологія фільтра показана на рисунку 4.8. Графіки прямих та зворотних втрат зображені на рисунку 4.9.

					РЕ21.468343.001 ПЗ	Лис
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		18

Filter Properties

Response

Bandpass

Type

Chebyshev

Topology

Interdigital

Order

5

Lower Cutoff Frequency

5150

MHz

Upper Cutoff Frequency

5925

MHz

Passband Ripple (dB)

0,01

Input \ Output Impedance (Ω)

50

Resonator Impedance (Ω)

50

Substrate Parameters

Dielectric Constant, ϵ_r

3.66

Dielectric Height

0.76

mm

Conductor Thickness

35

μm

Compute

Reset

Рисунок 4.7 — Параметри фільтру та підкладки

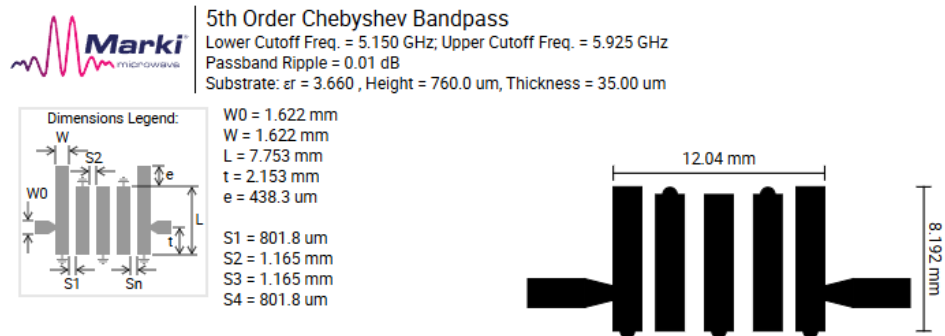


Рисунок 4.8 — Топологія фільтру

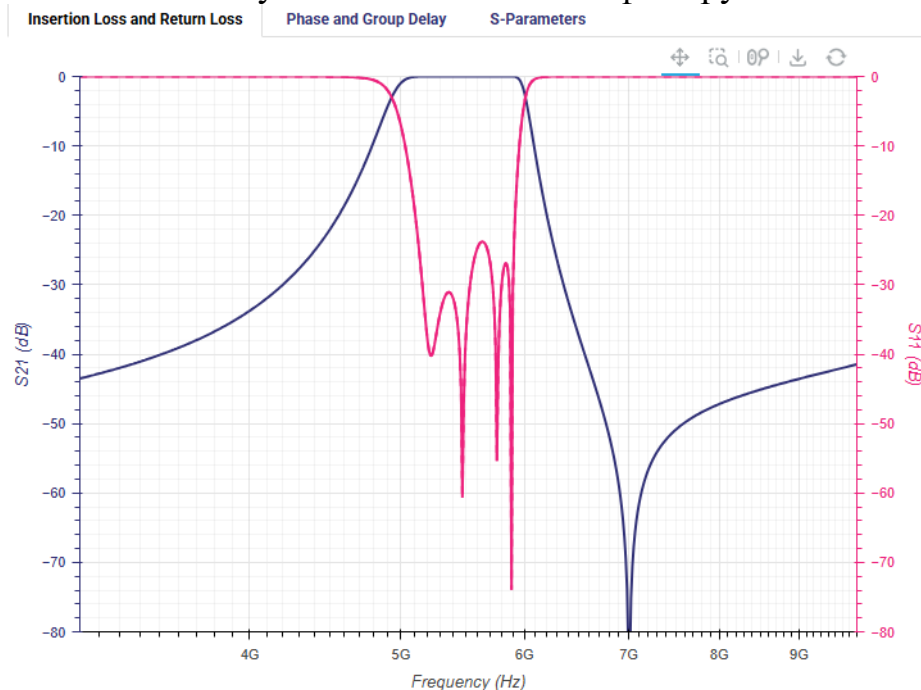


Рисунок 4.9 — Частотна характеристика прямих та зворотних втрат фільтру

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468343.001 ПЗ

Лис
19

Надалі було вирішено проектувати фільтр у AWR Design Environment з метою підвищення точності моделювання та переходу від спрощеного онлайн-розрахунку до повноцінного електромагнітного аналізу.

4.3 Проектування фільтру у AWR Design Environment

4.3.1 Задання параметрів та первинний обрахунок фільтру

Аналогічні розрахунки, виконані раніше за допомогою онлайн-калькулятора, проводимо також у середовищі AWR, використовуючи вбудований Wizard Filter Synthesis. Параметри фільтра та цілі оптимізації наведені на рисунку 4.10. Параметри підкладки вказані на рисунку 4.11.

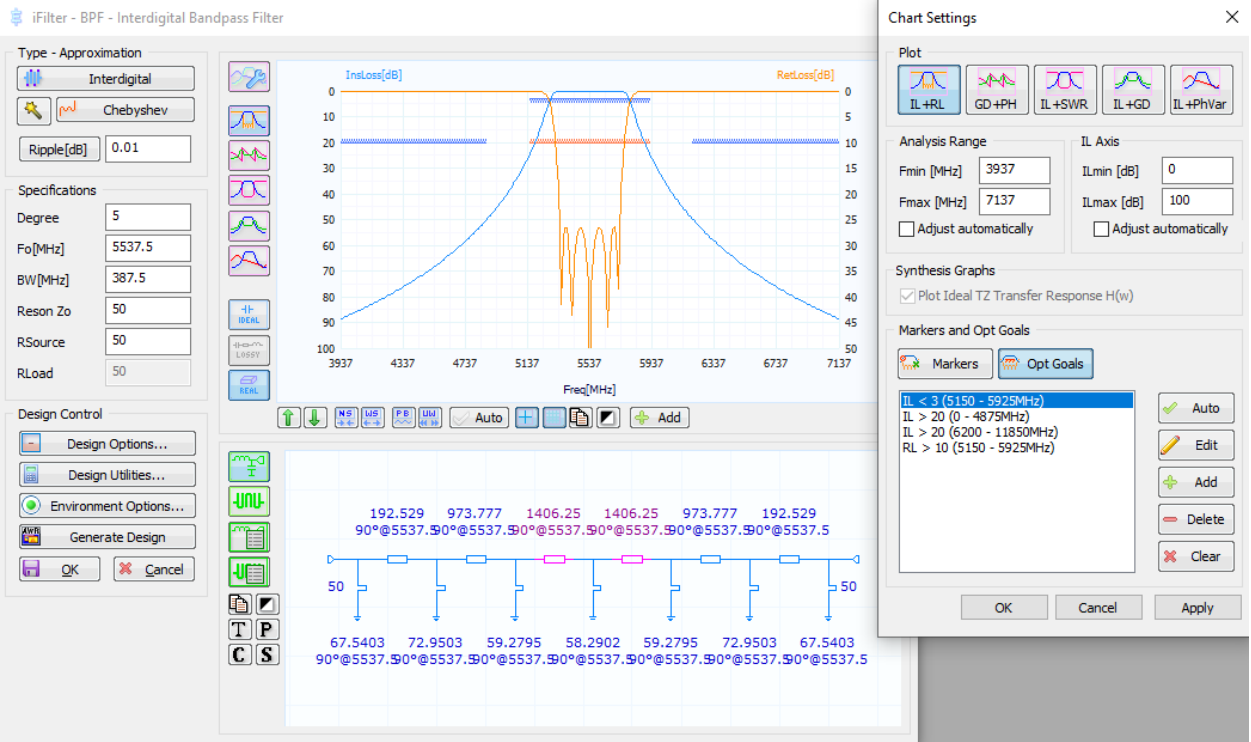


Рисунок 4.10 — Параметри фільтру та цілі його оптимізації

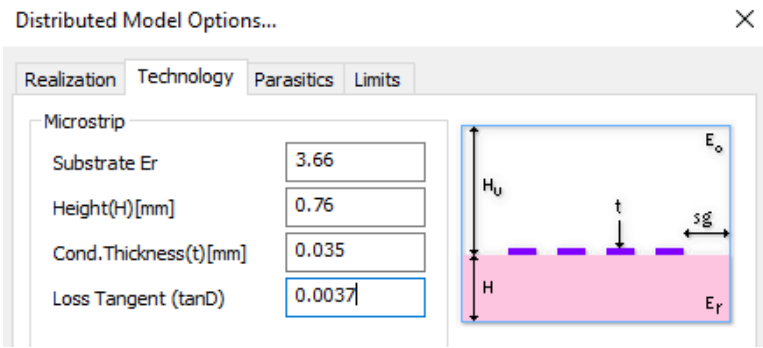


Рисунок 4.11 — Параметри підкладки

Крім того, у AWR є можливість врахувати технологічні обмеження виробника друкованих плат, а саме мінімально допустиму ширину провідника та мінімальну відстань між провідниками. Згідно з технологічними можливостями компанії JLCPCB, ці параметри становлять 0,1 мм (рисунок 4.12). Відповідні значення вносяться до налаштувань у вікні Disturbed Model Options → Limits → Printed Structures у рядках Min Width та Min Spacing (рисунок 4.13).

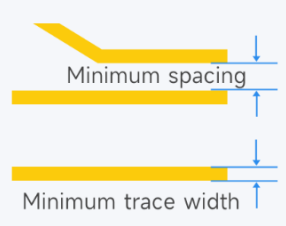
Features	Capability	Description	Patterns
Min. track width and spacing (1 oz)	0.10 / 0.10 mm (4 / 4 mil)	1- and 2-layer: 0.10 / 0.10 mm (4 / 4 mil) Multilayer: 0.09 / 0.09 mm (3.5 / 3.5 mil). 3 mil is acceptable in BGA fan-outs.	
Min. track width and spacing (2 oz)	0.16 / 0.16 mm (6.5 / 6.5 mil)	2-layer: 0.16 / 0.16 mm (6.5 / 6.5 mil) Multilayer: 0.15 / 0.15 mm (6 / 6 mil)	
Min. track width and spacing (2.5 oz)	2 layer: 0.2/0.2mm(8mil/8mil)		
Min. track width and spacing (3.5 oz)	2 layer: 0.25/0.25mm(10mil/10mil)		
Min. track width and spacing (4.5 oz)	2 layer: 0.3/0.3mm(12mil/12mil)		

Рисунок 4.12 — Обмеження виробника щодо ширини провідника та відстані між провідниками

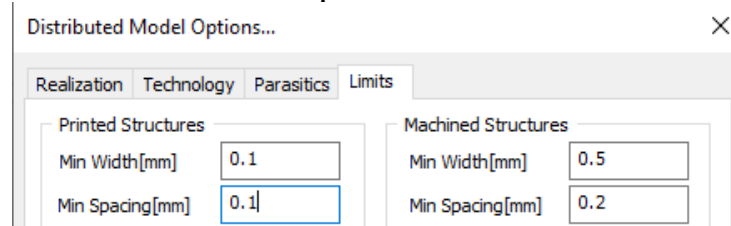


Рисунок 4.13 — Параметри ширини провідника та відстані між провідниками на друкованій платі

У вікні генерування схеми (рисунок 4.14) задаємо діапазон частот для аналізу — від 3937 МГц до 7137 МГц. Далі у розділі Tuning and Optimization активуємо функції, що дозволяють коригувати змінні параметри фільтра, а також опцію відображення цілей оптимізації. Крім того, у цьому ж вікні обираємо графіки для побудови:

- прямих та зворотних втрат;
- прямих втрат та коефіцієнта стоячої хвилі.

Generate Schematic

General

Base Name

iFilter

☐ Overwrite existing schematics and graphs

Schematic

☒ Use variables for element parameters
☒ Display filter design specification

Simplify schematic view by hiding

☐ Names ☐ Minor params
☐ Units ☐ Snapping Grid
☐ Labels

Analysis

☒ Analyze design after generation
☒ Use range below (not project defaults)

Fmin [MHz]

3937

Set to current range

Fmax [MHz]

7137

of steps

201

Graphs

☒ Use fixed axis settings instead of Auto

Generate

☒ Insertion Loss + Return Loss
☐ Group Delay + Phase
☒ Insertion Loss + SWR
☐ Insertion Loss + Group Delay

Tuning and Optimization

☒ Mark Tuning Variables
☒ Set Optimization Goals

Models and Topologies

☒ Use X-models for Microstrip
☐ Generate a balanced topology (2*RS)
☐ Use APLAC Linear Simulator

Рисунок 4.14 — Вікно для створення схеми та побудова графіків

Топологія фільтру зображена на рисунку 4.15. Також там вказані параметри підкладки та змінні параметри фільтру. Геометричні параметри фільтру зазначенні у таблиці 4.1.

Рисунок 4.15 — Топологія фільтру та його параметри

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468343.001 ПЗ

Лис
22

Таблиця 4.1 — Геометричні параметри фільтру

Назва	Значення, мм	Параметр
W1_v1	1,098	Ширина резонаторів
S1_v1	0,8151	Відстань між першим та другим, четвертим та п'ятим резонаторами
S2_v1	1,1476	Відстань між другим та третім, третім та четвертим резонаторами
LTOT	7,0525	Загальна довжина одного резонатору
LBot	1,3992	Довжина нижніх зв'язаних мікросмужкових ліній
Ltee	0,1098	Довжина зв'язаних мікросмужкових ліній, що знаходяться посередині
Ltop	$L_{Top} = LTOT - L_{Bot} - L_{tee} = 4,14368$	Довжина верхніх зв'язаних мікросмужкових ліній
Ltaper	0,3294	Довжина конічного переходу
L_v1	4,5	Довжина вхідної і вихідної мікросмужки
L_v2	0,2127	Різниця довжин між крайніми (перша та п'ята) та центральною резонаторами
D_v1	0,8235	Діаметр перехідних отворів
H_v1	0,508	Товщина підкладки
T_v1	0,035	Товщина шарів металізації

На рисунку 4.16 зображено зображення фільтра на площині. Блакитними лініями показаний зв'язок між зв'язаними мікросмужковими лініями. Червоним зображено перехідні отвори.

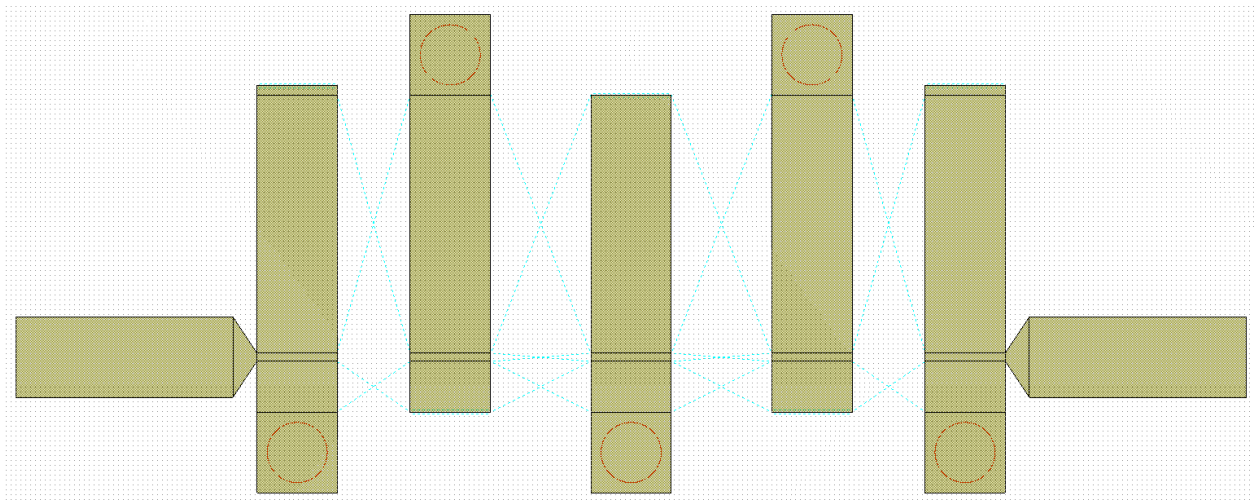


Рисунок 4.16 — 2D зображення фільтру

На рисунках 4.17 та 4.18 зображені частотні характеристики фільтру а саме прямі та зворотні втрати (рисунок 4.17) та прямі втрати та КСХ (рисунок 4.18).

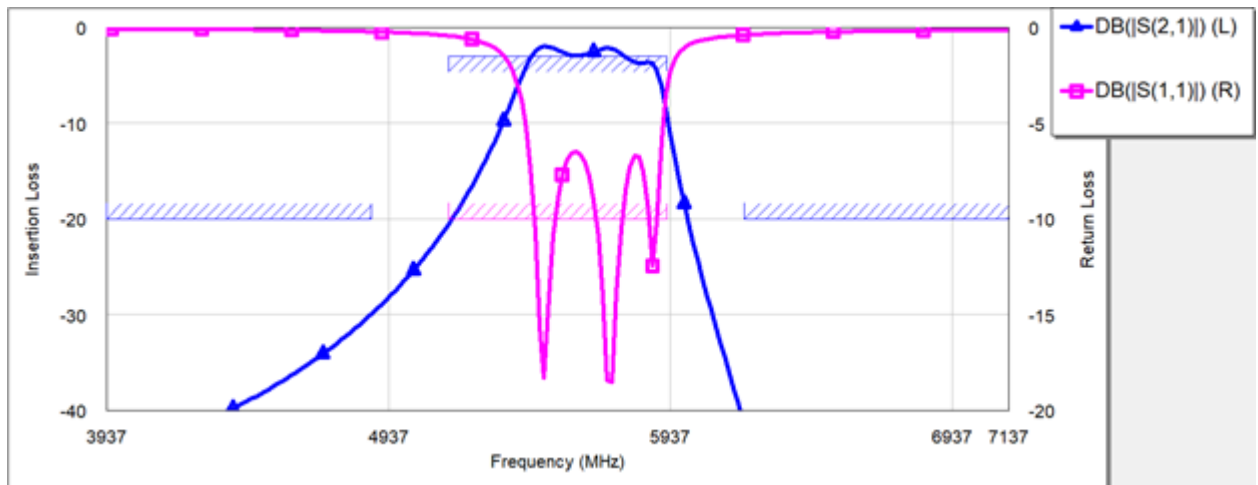


Рисунок 4.17 — Прямі та зворотні втрати фільтру(прямі втрати зображені синім, зворотні — рожевим)

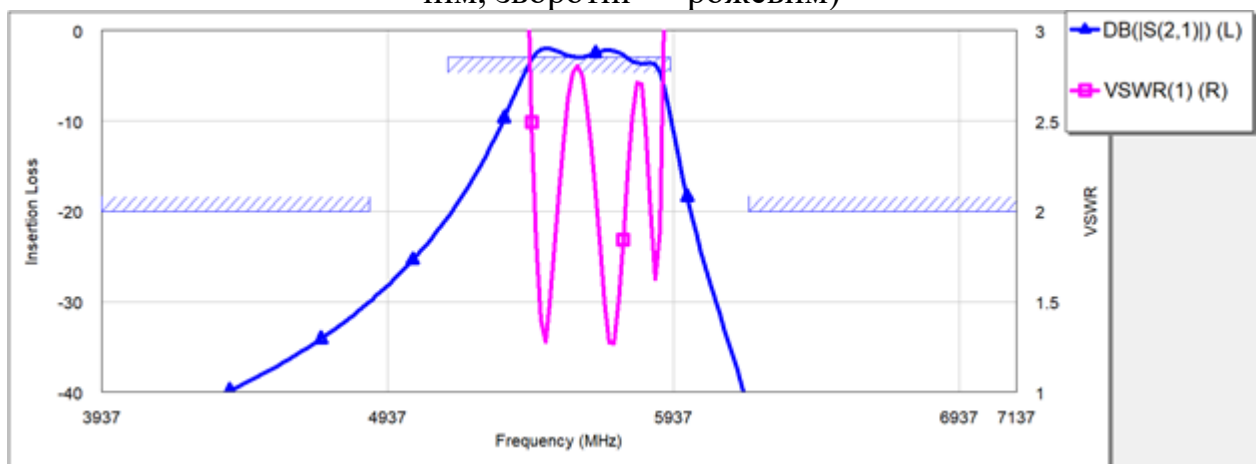


Рисунок 4.18 — Прямі втрати та КСХ фільтру (прямі втрати зображені синім, КСХ — рожевим)

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РЕ21.468343.001 ПЗ

Лис
24

4.3.2 Оптимізація фільтру

Для коректної роботи фільтру необхідно щоб мікросмужки на вході та виході мали хвильовий опір рівний 50 Ом. Для цього скористаємось онлайн калькулятором, що надає Rogers. З рисунку 4.19 бачимо, що ширина мікросмужкової лінії становить 1,65 мм.

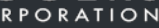
					
Required Input Data - Microstrip - Conventional					
Select Material	RO4350B™	Copper Thickness	0.035		
Dk Type	Wideband	Conductor Width	1.65		
Dk, Df	3.691, 0.0037	Space	0		
Copper Type	1 oz ED	Discrete Freq (GHz)	0.001		
Substrate Thickness	0.762				
Model Output		Download CSV			
Model name:	Microstrip using 0.762 thick RO4350B material, with 1 oz ED copper				
Frequency:	0.001				
Dk type:	Wideband				
Dk:	3.6914041423				
Impedance:	50.15 ohms				

Рисунок 4.19 — Онлайн калькулятор хвильового опори мікросмужки

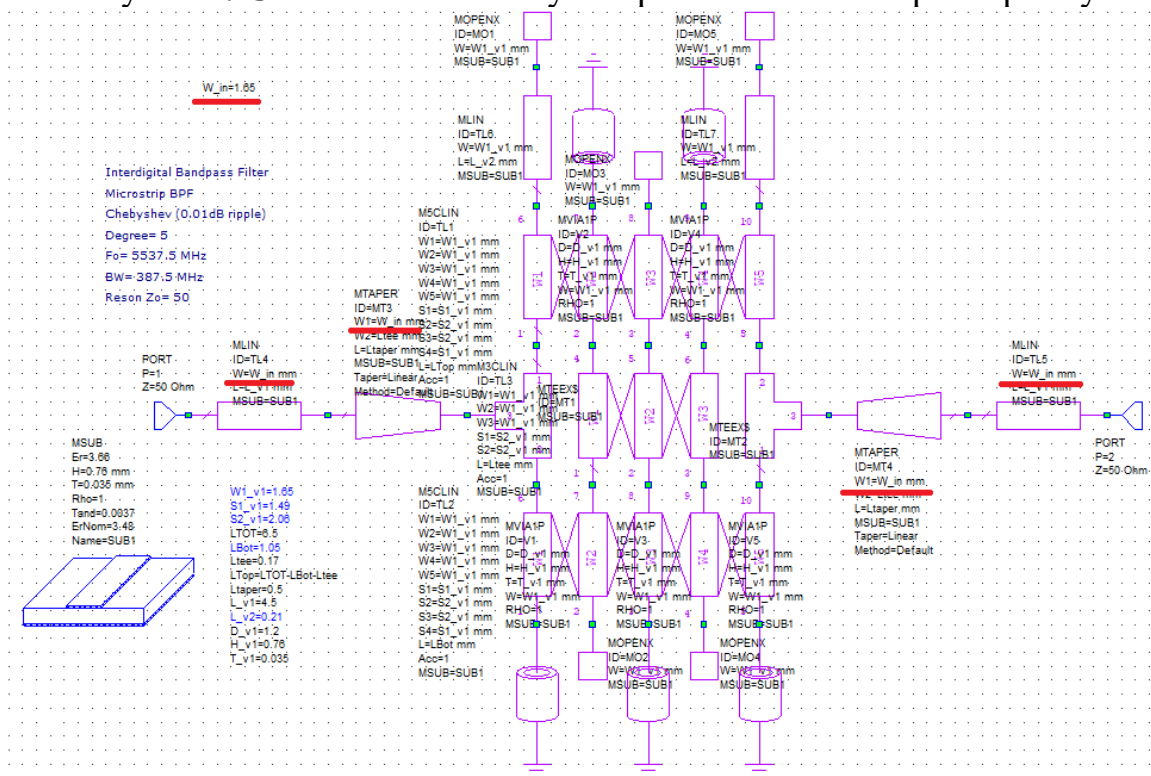


Рисунок 4.20 — Топологія фільтру з оновленим значенням ширини вхідних і вихідних мікросмужок

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468343.001 ПЗ

Для того щоб зафіксувати ширину провідника на значенні 1,65 мм необхідно створити рівняння (Equation) $W_{in}=1.65$ (рис. 4.20) та записати цю змінну у значення ширини вхідних та вихідних мікросмужок.

У вікні Simulate → Optimize оптимізуємо фільтр, щоб він виконував поставлені цілі оптимізації. Попередньо, встановлюємо більш точні цілі оптимізації (рисунок 4.21).

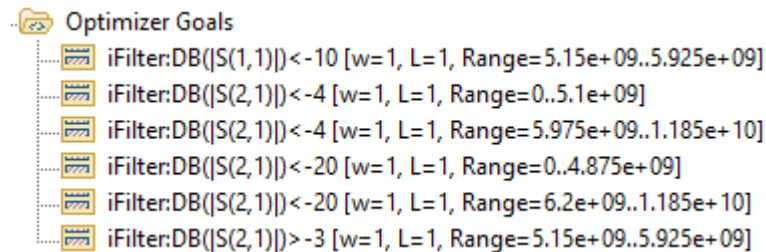


Рисунок 4.21 — Зміннені цілі оптимізації

У вікні оптимізації у вікні Vars, де знаходяться всі змінні, з них відфільтровано ті, що будуть оптимізуватися (рисунок 4.22).

Document	Element	ID	Parameter	Value	✓ Tune	✓ Optimize	✓ Constrain	Lower	Upper
iFilter	EQN		W1_v1	1.65	☒	☒	☒	1.32	2
iFilter	EQN		S1_v1	1.49	☒	☒	☒	1.2	1.8
iFilter	EQN		S2_v1	2.06	☒	☒	☒	1.65	2.5
iFilter	EQN		LBot	1.05	☒	☒	☒	0.8	1.255
iFilter	EQN		L_v2	0.21	☒	☒	☒	0.15	0.25

Рисунок 4.22 — Вікно оптимізації фільтру

Для полегшення оптимізації було ітераційно налаштовано кожну змінну, тим самим ми звузили смугу значень змінних.

З рисунків 4.17 та 4.18 видно, що смуга вужча за необхідну та дещо зсунута праворуч. Оптимізацію почали з параметрів S1_v1 та S2_v2, оскільки відстань між резонаторами впливає на ширину смуги пропускання — зменшення відстані збільшить коефіцієнт зв'язку резонаторів, що розширить смугу пропускання. Для зменшення центральної частоти фільтру ми збільшували параметр ширини резонаторів W1_v1 — це збільшить ємність лінії, що зменшить швидкість поширення електромагнітної хвилі вздовж резонатора:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{\sqrt{\frac{1}{L'C'}}}{4l},$$

де $v = \sqrt{\frac{1}{L'C'}}$ — швидкість поширення ЕМ хвилі вздовж резонатора, L' , C'

— погонні індуктивність і ємність;

$l = \frac{\lambda}{4}$ — довжина резонатора, λ — довжина хвилі;

Після останньої загальної оптимізації всіх змінних отримали наступні значення параметрів та характеристик фільтру:

Document	Element	ID	Parameter	Value	✓ Tune	✓ Optimize	✓ Constrain	Lower	Upper	Step Size
iFilter	EQN		W1_v1	1.78	☒	☒	☒	1.32	2	0.01
iFilter	EQN		S1_v1	1.02	☒	☒	☒	0.8	1.3	0.01
iFilter	EQN		S2_v1	1.34	☒	☒	☒	1	1.7	0.01
iFilter	EQN		LBot	0.44	☒	☒	☒	0.25	0.75	0.01
iFilter	EQN		L_v2	0.21	☒	☒	☒	0.2	0.35	0.01

Рисунок 4.23 — Оптимізовані параметри фільтру

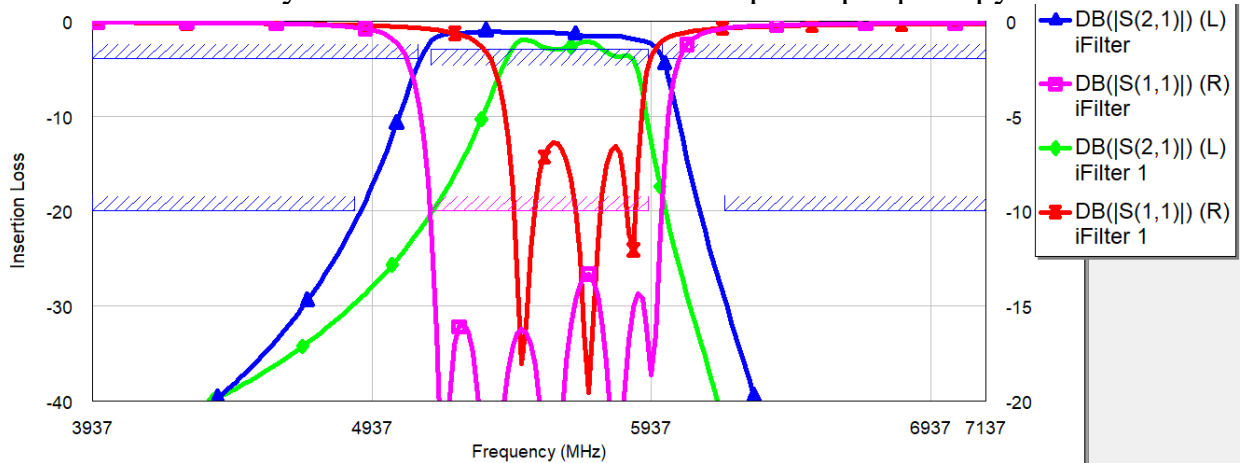


Рисунок 4.24 — Прямі та зворотні втрати фільтру до оптимізації (прямі втрати зображені зеленим, зворотні — червоним) та прямі і зворотні втрати після оптимізації (прямі втрати зображені синім, зворотні — рожевим)

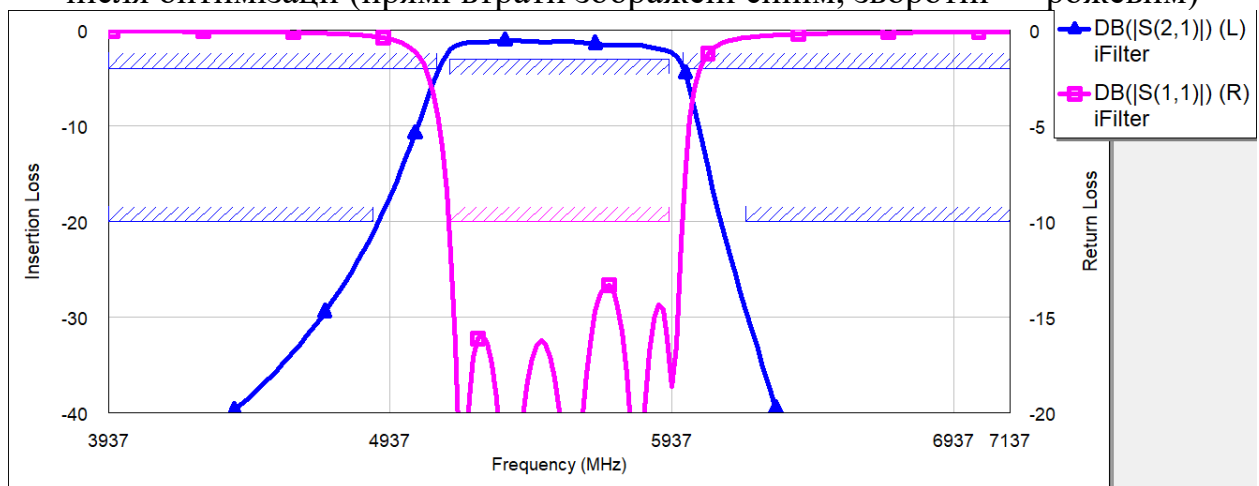


Рисунок 4.25 — Прямі та зворотні втрати оптимізованого фільтру (прямі втрати зображені синім, зворотні — рожевим)

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РЕ21.468343.001 ПЗ

Лис
27

4.3.3 Електромагнітний аналіз та подальша оптимізація фільтру

Отримана, за допомогою Filter Synthesis Wizard, модель враховує тільки ті зв'язки між резонаторами, які виконані як зв'язаними мікросмужковими лініями (Coupled microstrip lines)(рисунок 4.25). Проте вона не враховує взаємний вплив усіх елементів структури як єдиної електромагнітної зв'язаної системи. Модель частково враховує ефект відкритого кінця (Microstrip open end effect) — явище, коли реальний електричний кінець мікросмужкової лінії не збігається з її геометричним кінцем. Проте модель не враховує вплив втрат у діелектрику та провіднику. Так само модель не враховує вплив товщин провідників, що під'єднується до мікросмужкового трійника (Microstrip tee). Тому було вирішено провести електромагнітний аналіз фільтру.

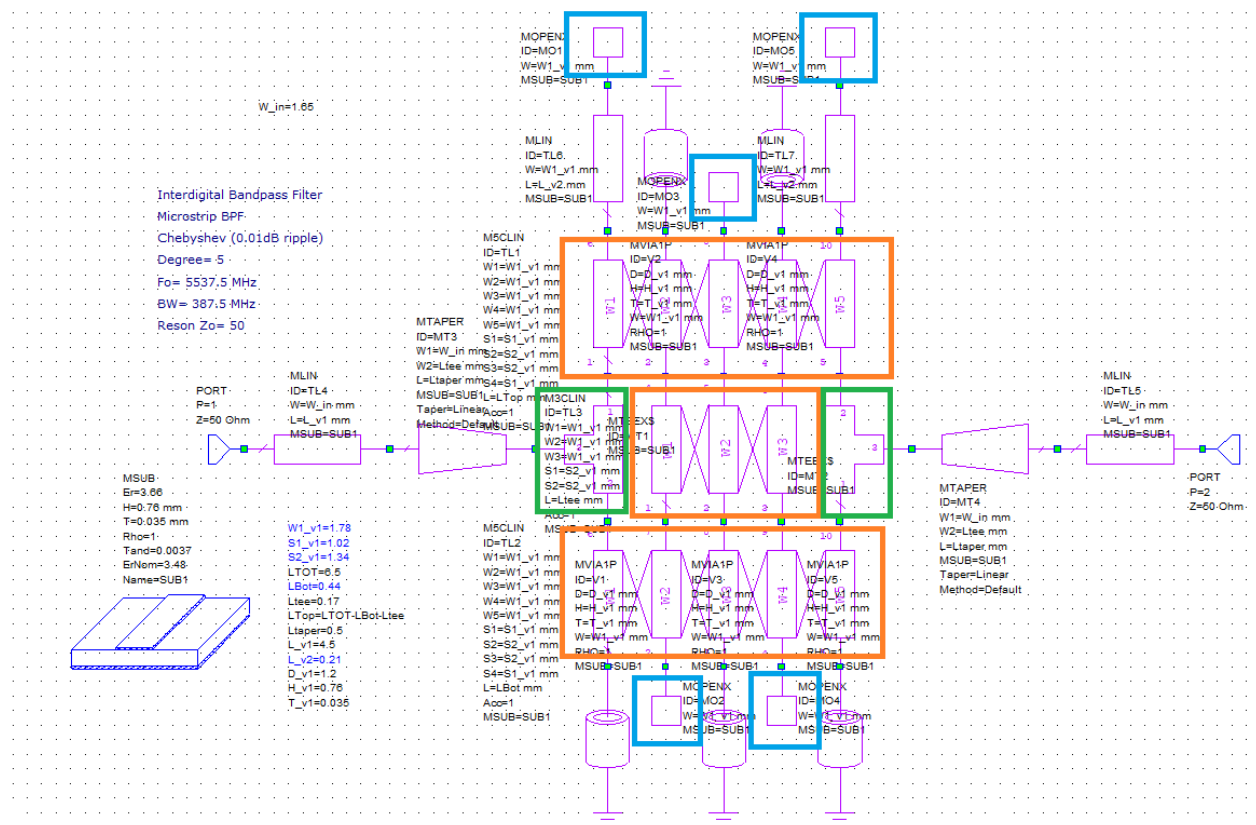


Рисунок 4.25 — Модель фільтру (помаранчевим обведені зв'язані мікросмужкові лінії, голубим — ефект відкритого кінця, зеленим — мікросмужковий трійник)

Проведення електромагнітного аналізу є необхідним для отримання більш точних результатів порівняно зі звичайним моделюванням, оскільки дозволяє врахувати реальні фізичні явища, що виникають у високочастотних структурах. Зокрема, під час електромагнітного моделювання враховуються

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РЕ21.468343.001 ПЗ

паразитні електромагнітні зв'язки між провідниками, неоднорідний розподіл струмів, втрати в провідниках і діелектрику, а також вплив геометричних параметрів друкованої плати та металізованих отворів на характеристики пристрою. Це дає можливість більш точно визначити частотні характеристики.

Для проведення електромагнітного аналізу було обрано модуль AXIEM. Даний симулятор призначений для моделювання планарних структур, до яких належать мікросмужкові лінії передачі, фільтри та інші високочастотні пристрої, реалізовані на друкованих платах. AXIEM використовує метод моментів (Method of Moments), який обчислює струми на провідниках, розташованих у стеку плоских діелектричних шарів. Це забезпечує високу точність розрахунків для мікросмужкових структур при відносно невеликих витратах обчислювальних ресурсів і часу моделювання.

Вибір AXIEM також обумовлений особливостями розроблюваного пристрою. Оскільки його конструкція є планарною, використання повноцінного тривимірного симулятора, такий як Analyst, є недоцільним. Модуль Analyst орієнтований на аналіз складних тривимірних структур, таких як хвилеводи, коаксіальні переходи, роз'єми, корпуси та інші об'ємні елементи, де необхідний розрахунок електромагнітного поля в усьому об'ємі конструкції. Для планарних мікросмужкових пристроїв застосування Analyst суттєво збільшує час розрахунку та вимоги до обчислювальних ресурсів без помітного підвищення точності результатів.

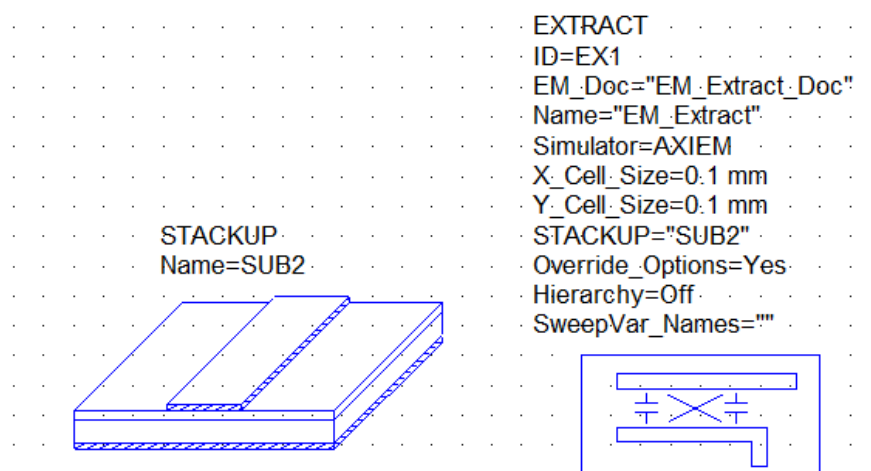


Рисунок 4.25 — Створений Stackup та Extract

Перед проведенням електромагнітного аналізу було сформовано структуру шарів друкованої плати (Scripts → EM → Create_Stackup), яка визначає взаємне розташування провідних і діелектричних шарів, їхню товщину та електричні параметри матеріалів. Автоматично було створено Extract — набір правил за яким буде проводитися ЕМ аналіз (рисунок 4.25).

У налаштуваннях Stackup зазначаємо параметри нашої підкладки (рисунок 4.26).

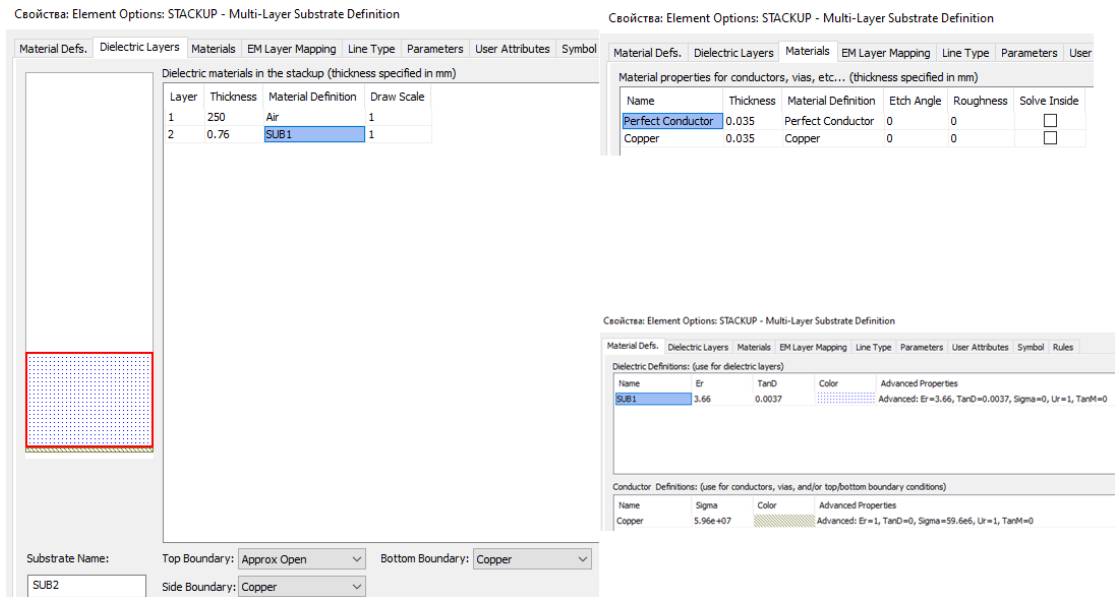


Рисунок 4.26 — Параметри підкладки

Після проведення електромагнітного аналізу отримали наступні частотні характеристики фільтру:

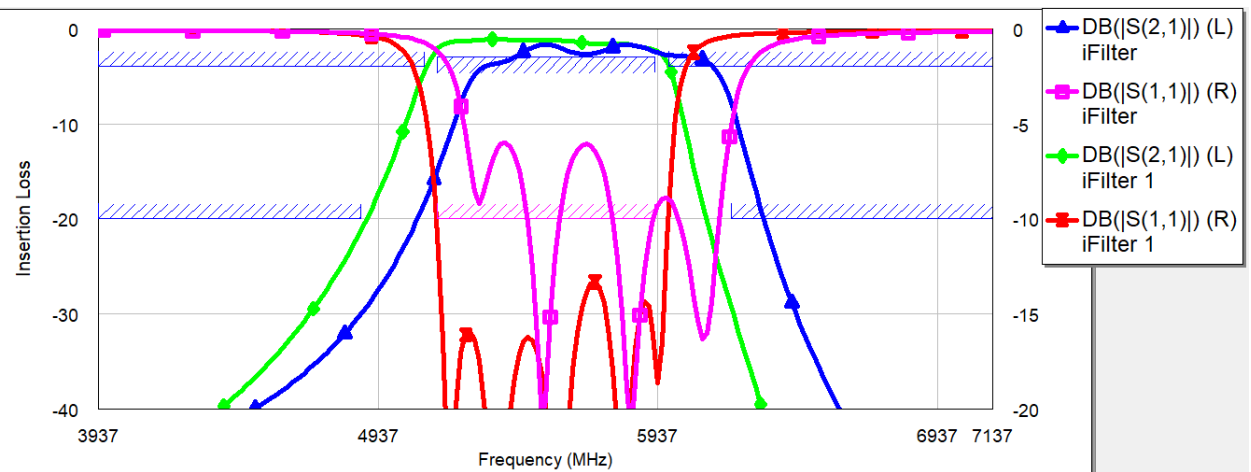


Рисунок 4.27 — Прямі та зворотні втрати фільтру до ЕМ аналізу (прямі втрати зображені зеленим, зворотні — червоним) та прямі і зворотні втрати після аналізу (прямі втрати зображені синім, зворотні — рожевим)

Як бачимо, характеристики фільтру погіршилися — зворотні втрати у смузі пропускання зросли, а центральна частота смуги пропускання зсунулась вправо. Тому фільтр потребує додаткової оптимізації.

Для зменшення центральної частоти фільтру ми збільшували параметр ширини резонаторів W1_v1 та довжини резонаторів LTOT. Також поступово збільшували різницю довжин між крайніми (перший та п'ятий) та центральним резонаторами (L_v2), через що зменшувались зворотні втрати у смузі пропускання. Оскільки ширина резонаторів W1_v1 також впливає на ширину смуги, то було оптимізовано параметри відстані між резонаторами S1_v1 та S2_v1.

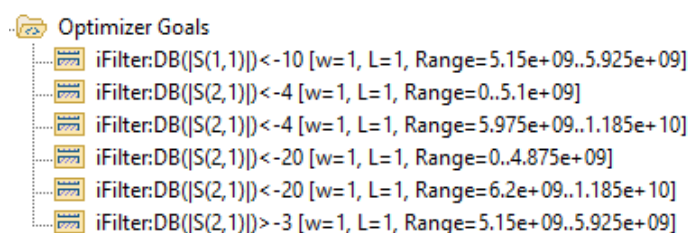


Рисунок 4.28 — Цілі оптимізації

Після кінцевої оптимізації отримали наступні параметри фільтру:

Document	Element	ID	Parameter	Value	✓ Tune	✓ Optimize	✓ Constrain	Lower	Upper	Step Size
iFilter	EQN		S2_v1	1.2	☒	☒	☒	1	1.22	0.01
iFilter	EQN		W1_v1	2	☒	☒	☒	1.98	2.2	0.01
iFilter	EQN		S1_v1	0.96	☒	☒	☒	0.9	1.1	0.01
iFilter	EQN		L_v2	0.35	☒	☒	☒	0.34	0.45	0.01
iFilter	EQN		LBot	0.58	☒	☒	☒	0.5	0.7	0.01
iFilter	EQN		LTOT	6.5	☒	☒	☒	6.45	6.55	0.01

Рисунок 4.29 — Оптимізовані параметри фільтру

У таблиці 4.2 вказано геометричні параметри оптимізованого фільтру з ЕМ аналізом.

Таблиця 4.2 — Геометричні параметри оптимізованого фільтру

Назва	Значення, мм	Назва	Значення, мм
W1_v1	2	Ltee	0,17
S1_v1	0,96	LTop	5,75
S2_v1	1,2	Ltaper	0,5
LTOT	6,5	L_v1	4,5
Lbot	0,85	L_v2	0,35

Частотні характеристики оптимізованого фільтру з ЕМ аналізом зображені на рисунках 4.30 – 4.32.

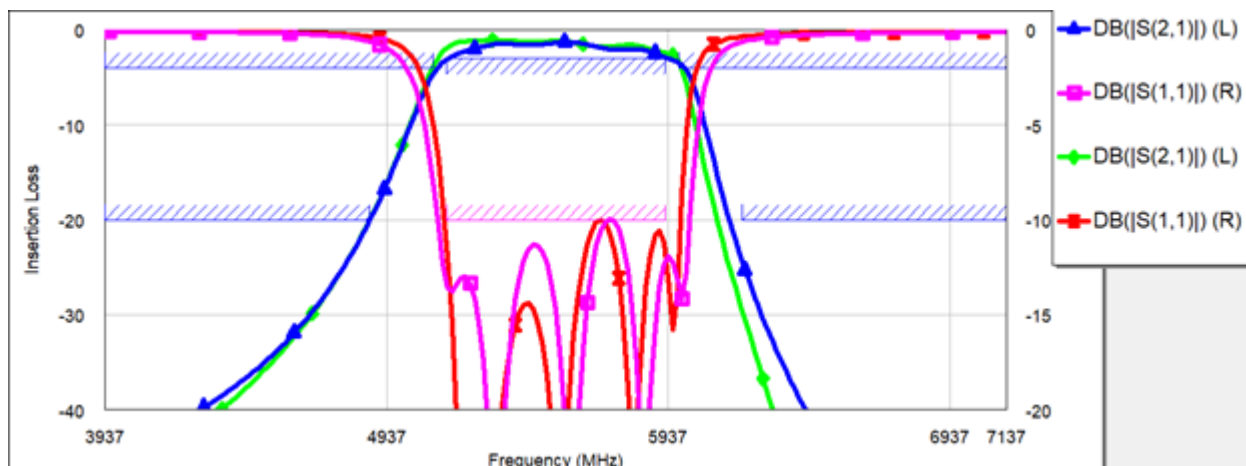


Рисунок 4.30 — Прямі та зворотні втрати оптимізованого фільтру до ЕМ аналізу (прямі втрати зображені синім, зворотні — рожевим) та прямі і зворотні втрати після ЕМ аналізу та додаткової оптимізації (прямі втрати зображені зеленим, зворотні — червоним)

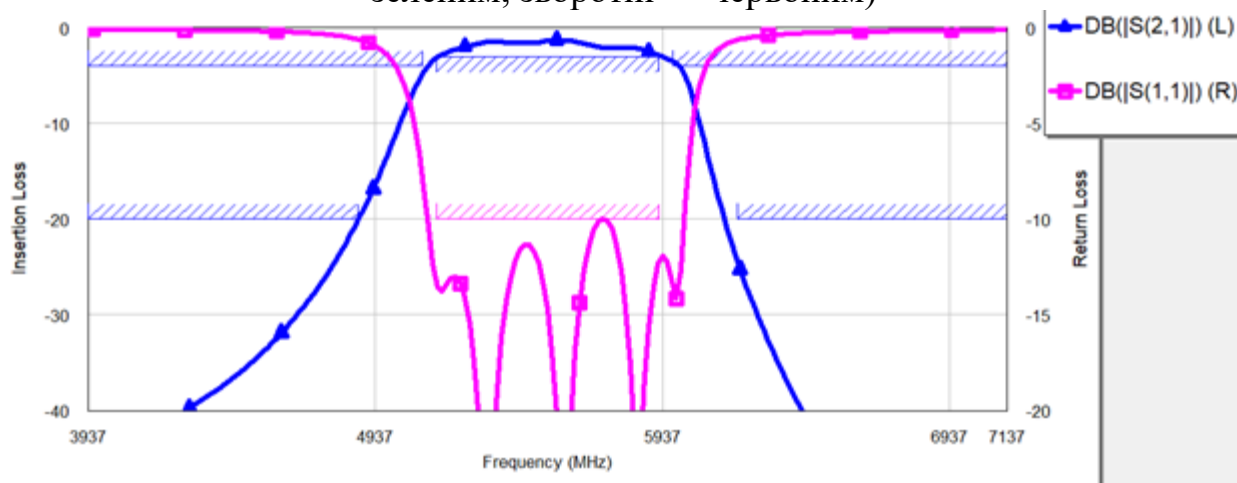


Рисунок 4.31 — Прямі та зворотні втрати після ЕМ аналізу та додаткової оптимізації (прямі втрати зображені синім, зворотні — рожевим)

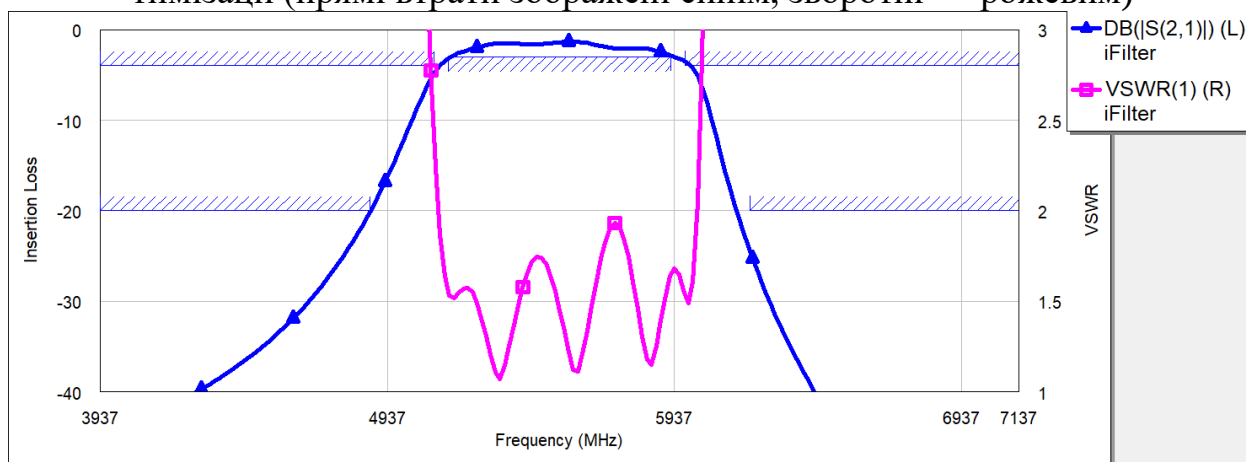


Рисунок 4.32 — Прямі втрати та КСХ фільтру (прямі втрати зображені синім, КСХ — рожевим)

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

РЕ21.468343.001 ПЗ

Лис

32

[illegible]

Таблиця 4.2 — Отримані характеристики фільтру

Смуга пропускання	5,15 – 5,925 ГГц	Порядок	5
Нерівномірність у смузі пропускання	3 дБ	Зворотні втрати (та КСХ) у смузі пропускання	До –10 дБ (до 1,9)

5 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ ТА ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Друкована плата, (ДП, РСВ) — пластина, виконана з діелектрика (скло-текстоліт, текстоліт, гетинакс, ситал тощо), на якій або/і всередині якої сформовано бодай один шар із провідними доріжками. На друковану плату монтуються електронні компоненти, які з'єднуються своїми виводами з елементами провідного рисунка паянням, або, значно рідше, зварюванням, внаслідок чого складається електронний модуль — змонтована друкована плата.

Двошарова друкована плата — це тип РСВ, що має два провідні шари міді: верхній (Top layer) і нижній (Bottom layer). Між ними знаходиться діелектричний матеріал. З'єднання між шарами здійснюється за допомогою металізованих перехідних отворів (vias). Структура двошарової ДП зображена на рисунку 5.1.

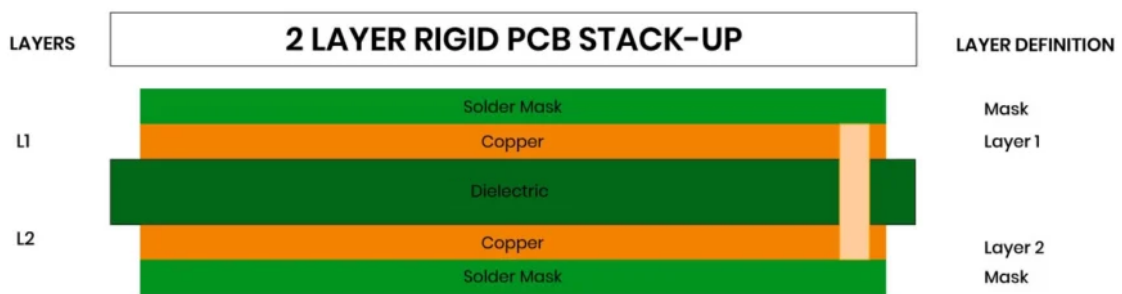


Рисунок 5.1 — Структура двошарової ДП

Для надвисоких частот зазвичай застосовують двошарові друковані плати, оскільки двошарова структура дозволяє реалізувати контрольований хвильовий опір мікросмужкових та копланарних ліній передачі, що є критично важливим для RF-схем. Ще однією перевагою є відносна простота моделювання та розрахунку таких структур у програмних засобах електромагнітного аналізу.

У пункті 4.1 вже було визначено параметри двошарової ДП:

Тоді плата буде мати наступні параметри:

- товщина діелектрику: 0,76 мм;
- матеріал діелектрику: RO4350B;
- товщина провідника: 1 oz = 35 мкм;

- ДП має два шари металізації, компонування елементів буде здійснюватися з однієї сторони, крім роз'єму для антени.

5.1 Розрахунок мінімальної площі ДП

Мінімальна площа друкованої плати рахується за допомогою формули:

$$S_{\text{ДП}} = 1 \times \sum S_{\text{МГ}} + 1,5 \times \sum S_{\text{СГ}} + 2 \times \sum S_{\text{ВГ}} + S_{\text{КР}},$$

де $S_{\text{МГ}}$ — площа малогабаритних елементів;
 $S_{\text{СГ}}$ — площа середньогабаритних елементів;
 $S_{\text{ВГ}}$ — площа великогабаритних елементів;
 $S_{\text{КР}}$ — площа елементів кріплення.

На рисунку 5.2 зображено список елементів, площу кожного елемента та розрахунок мінімальної площі.

SMD компоненти				
Найменування	Площа	Коефіцієнт	Кількість	Сума
BG306-06-A-1-0400-L-B, 6 pin	85,857	1,5	1	128,7855
GCM21BM8EH475KE08L-4.7uF-50VDC-Murata Electronics	8,342	1	1	8,342
GRM033R61C105ME15D-1 uF - 16 VDC-Murata Electronics	2,362	1	2	4,724
GRM033SC1E101FA01D-100 pF-25 VDC-Murata Electronics	2,362	1	1	2,362
GRM033SC1E330FA01D-33 pF-25 VDC-Murata Electronics	2,362	1	1	2,362
GRM033SC1H102GE01D-1000 pF-50 VDC Murata Electronics	2,362	1	1	2,362
GRT033C81C104KE01J-0.1 uF-16 VDC-Murata Electronics	2,362	1	1	2,362
QPF4506B	15,406	1,5	1	23,109
RCG040233K0JNED-33kOhm-0.1W-Vishay / Draloric	3,953	1	1	3,953
TE Connectivity 2337019-1	22,285	1	3	66,855
Загальна площа SMD компонентів				245,2165
Мікросмужковий смуговий фільтр	354	2	1	708
Кріплення				
Діаметр	Площа(навколо отвору)	Кількість	Площа	
M1,5	1,7	26,01	4	104,04
Площа плати				
704,8376667				

Рисунок 5.2 — Список компонентів електронного модуля та розрахунок мінімальної площі ДП

Мінімальна площа плати: 700 мм²

Розміри друкованої плати були обрані більшими за мінімально необхідні через необхідність встановлення екрана та забезпечення вимог до компонування високочастотного тракту. Обраний розмір ДП: 30 × 50 мм

5.2 Визначення можливостей виробника РСВ

Виробник JLCPCB забезпечує наступні параметри ДП для ламінату типу RO4350B:

					РЕ21.468343.001 ПЗ	Лис
						35
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

- фінішне покриття — для RF плат тільки ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold)
- мінімальний розмір ДП — 3×3 мм
- максимальний розмір ДП — 590×438 мм
- максимальна кількість шарів — 2
- товщина плати: 0,51 мм, 0,76 мм, 1,52 мм
- можлива товщина металізації — 1 oz
- мінімальна ширина провідника — 0,1 мм
- мінімальна відстань між друкованими елементами: 0,1 мм
- мінімальний розмір гарантійного пояса: 0,2 мм (Routed — фрезерування), 0,4 мм (V-cut — фрезерування V-подібною фрезою).
- мінімальний розмір отвору — 0,15 мм
- мінімальний розмір металізованого (перехідного) отвору — 0,15 мм.
- мінімальна товщина лінії шовкографії — 0,15 мм
- мінімальна відстань від контактного майданчика до захисної маски — 0,1 мм.

5.3 Розрахунок ширини провідника

Для високочастотної частини ми вже визначили ширину провідника у пункті 3.3.2 — 1,65 мм. Для розрахунку низькочастотної частини скористаємось онлайн калькулятором.

Розрахунок враховує струм, що протікає крізь провідник. Його ми візьмемо з документації до FEM:

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
ANT Port Return Loss			15		dB
Quiescent Current	RF Off		117		mA
Operating Current	P _{OUT} = +15 dBm		150		mA
	P _{OUT} = +24 dBm		270	300	mA

Рисунок 5.3 — Значення струмів споживання FEM

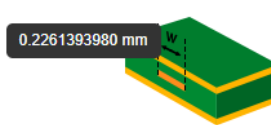
Також у розрахунку потрібно надати температуру навколишнього середовища — 25 °C, товщину провідника ($1 \text{ oz/ft}^2 \approx 35$ мкм) та допуск на скільки провідник може нагрітись (5 °C).

					PE21.468343.001 ПЗ	Лис
						36
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

Current (I) 0.3 A	Ambient Temperature 25 °C
Thickness (t) 1 oz/ft ²	Trace Length Enter Length... mm
Temperature Rise (T _{Rise}) 5 °C	

↓ ↓ ↓

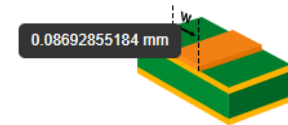
Minimum Trace Width



0.2261393980 mm

*Internal Layers:
Required Trace Width (W)
 mm

Minimum Trace Width



0.08692855184 mm

*External Layers in Air:
Required Trace Width (W)
 mm

Рисунок 5.4 — Розрахунок мінімальної ширини провідника

Значення 0,087 мм є замалим — виробник не зможе забезпечити це значення. Обрана мінімальна ширина провідника — 0,2 мм.

З'єднання між фільтром, високочастотними роз'ємами та мікросхемою здійснювалось за допомогою копланарних ліній зв'язку, що дозволить зменшити товщину провідника (менше відбиття сигналу у кінцевих переходах) та якість екранування via fence. Розрахунок ширини провідника проводився в онлайн калькуляторі (рисунок 5.5) і становить 0,68 мм.



ROGERS
CORPORATION

Required Input Data - Coplanar - Conductor Backed

Select Material	RO4350B™	Copper Thickness	0.03048
Dk Type	Wideband	Conductor Width	0.68
Dk, Df	3.691, 0.0037	Space	0.1
Copper Type	1 oz ED	Discrete Freq (GHz)	1
Substrate Thickness	0.762		

Model Output

Model name: Grounded coplanar waveguide using 0.762 thick RO4350B material, with 1 oz ED copper

Frequency: 1

Dk type: Wideband

Dk: 3.6914041423

Impedance: 50.05 ohms

Download CSV

Рисунок 5.5 — Розрахунок ширини копланарної лінії

5.4 Створення бібліотеки символів та посадкових майданчиків елементів

Розробка ДП буде проводитися у Altium Designer, тому спочатку було створено бібліотеки символів та посадкових місць (footprint).

До більшості елементів були знайдені готові бібліотеки посадкових місць та 3D моделей від розробника.

Footprint та 3D модель корпусу FEM було створено за допомогою IPC Complaint Footprint Wizard, обраний тип корпусу — PQFN (SMD, підтримує розташування виводів по периметру корпусу, має термопад). Розміри корпусу та виводів (рисунок 5.6) було взято з даташиту виробника. Виріз на термопаді було додано вручну (рисунок 4.6).

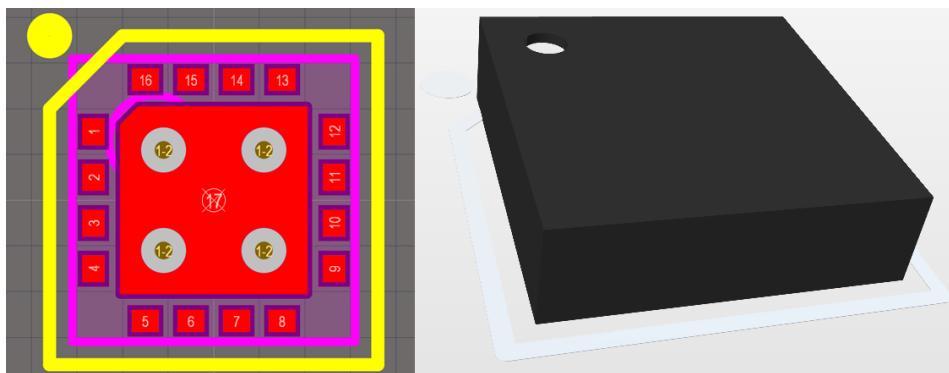


Рисунок 5.6 — Footprint та 3D модель QPF4506B

Footprint та 3D модель резистору RCG040233K0JNED також було створено за допомогою IPC Complaint Footprint Wizard, тип корпусу — CHIP. Розміри корпусу та виводів (рисунок 5.7) було взято з даташиту виробника.

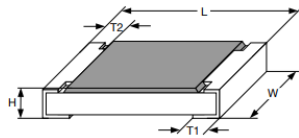
Для роз'єму SMP-MAX Jack (734205030) footprint був створений самостійно, 3D модель — виробника. Контактний майданчик був створений за допомогою двох Pad — прямокутного та власне створеного (Properties → Top Layer → Shape → Custom Shape → Edit Shape). Розміри майданчиків було взято з даташиту виробника (Рисунок 5.9).

Також було створено footprint мікросмужкового фільтру. Спочатку було експортовано топологію (у AWR: Layout → Export Layout) у форматі .dxf. Далі імпортували топологію у Altium (рис. 5.11). Додали п'ять Pad діаметром 1,2 мм, для заземлення резонаторів. За допомогою Tools → Convert → Create Region from Selected Primitives створили області металізації. Додали пади 1 та 2

					<i>PE21.468343.001 ПЗ</i>	Лис
						38
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

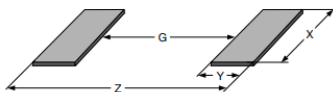
для підключення до фільтру за допомогою Tools → Convert → Create Custom Pad from Selected Outline.

DIMENSIONS



DIMENSIONS AND MASS						
TYPE / SIZE	L (mm)	W (mm)	H (mm)	T1 (mm)	T2 (mm)	MASS (mg)
RCG0402 e3	1.0 ± 0.05	0.5 ± 0.05	0.35 ± 0.05	0.25 ± 0.10	0.2 ± 0.10	0.65
RCG0603 e3	1.55 + 0.10 / - 0.05	0.85 ± 0.1	0.45 ± 0.05	0.3 ± 0.20	0.3 ± 0.20	2
RCG0805 e3	2.0 + 0.20 / - 0.10	1.25 ± 0.15	0.5 ± 0.10	0.3 + 0.20 / - 0.10	0.3 ± 0.20	5.5
RCG1206 e3	3.2 + 0.10 / - 0.20	1.6 ± 0.15	0.55 ± 0.05	0.45 ± 0.20	0.4 ± 0.20	10

SOLDER PAD DIMENSIONS



RECOMMENDED SOLDER PAD DIMENSIONS								
TYPE / SIZE	WAVE SOLDERING				REFLOW SOLDERING			
	G (mm)	Y (mm)	X (mm)	Z (mm)	G (mm)	Y (mm)	X (mm)	Z (mm)
RCG0402 e3	-	-	-	-	0.45	0.60	0.60	1.65
RCG0603 e3	0.65	1.10	1.25	2.85	0.75	0.75	1.00	2.25
RCG0805 e3	0.90	1.30	1.60	3.50	1.00	0.95	1.45	2.90
RCG1206 e3	1.40	1.40	1.95	4.20	1.50	1.05	1.80	3.60

Рисунок 5.7 — Розміри корпусу та контактних майданчиків для резистору RCG040233K0JNED

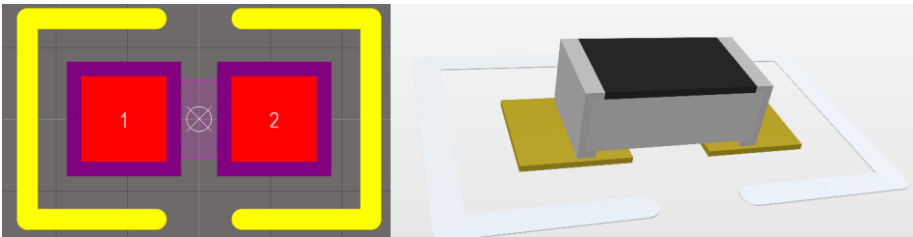


Рисунок 5.8 — Footprint та 3D модель RCG040233K0JNED

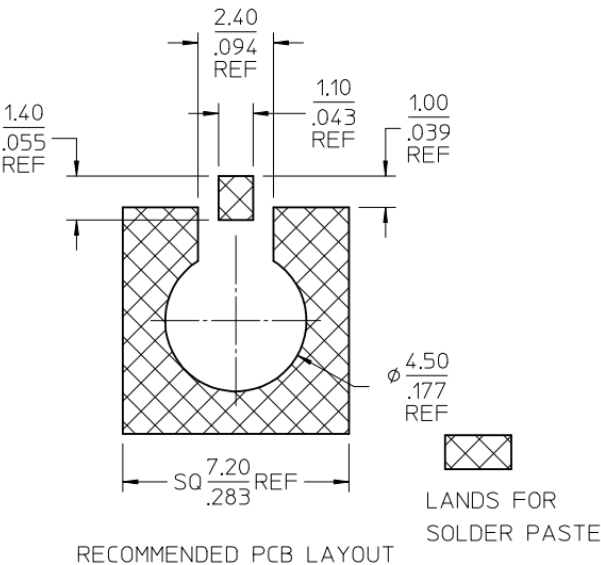


Рисунок 5.9 — Розміри контактних майданчиків для SMP-MAX роз'єму

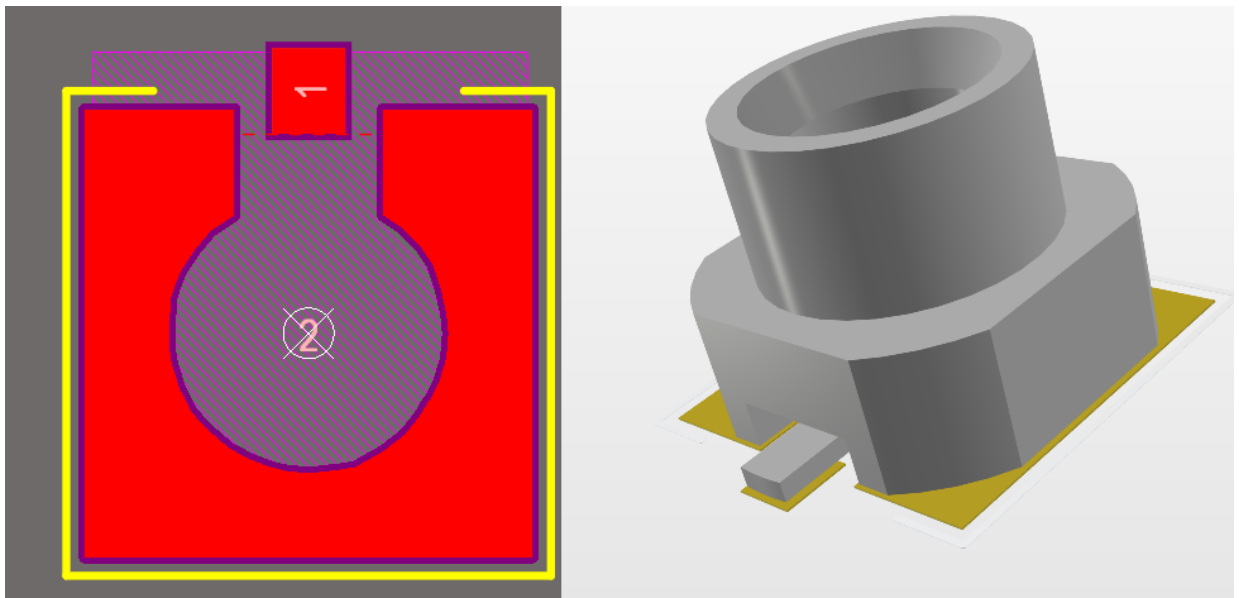


Рисунок 5.10 — Footprint та 3D модель SMP-MAX роз'єму

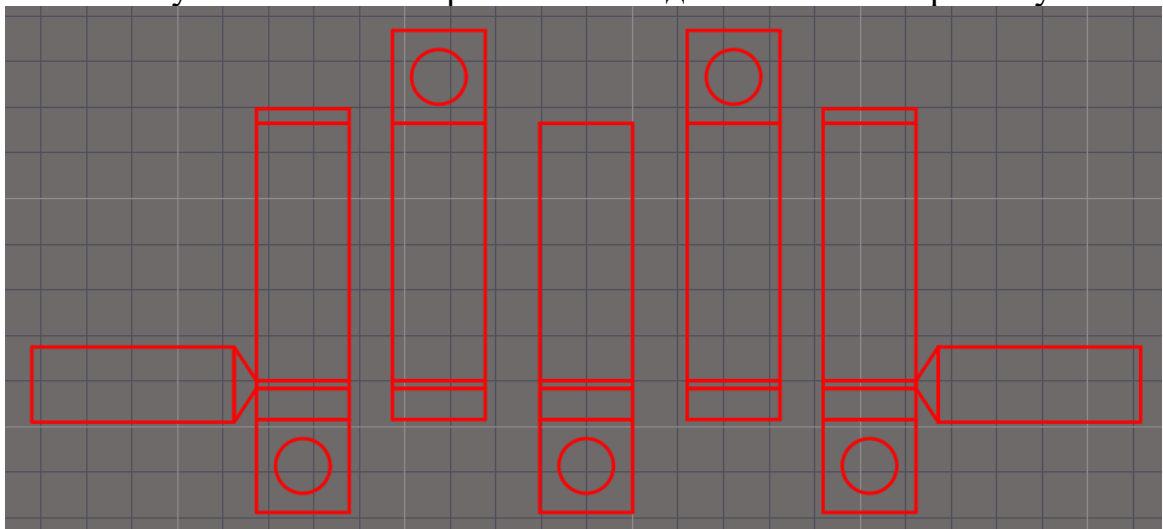


Рисунок 5.11 — Імпортований файл фільтру

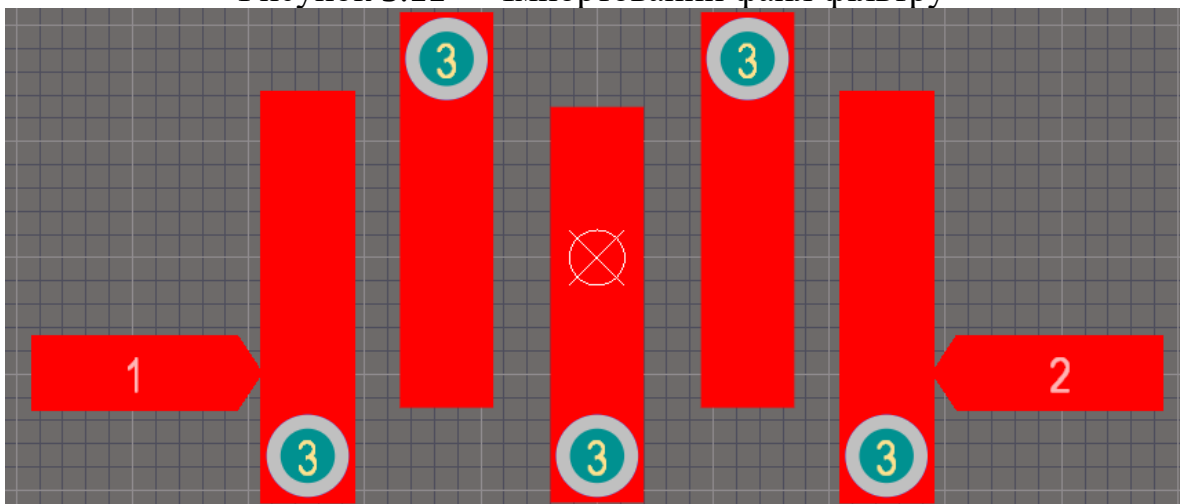


Рисунок 5.12 — Footprint мікросмушкового фільтру

Footprint екрану було відкоригований — доданий шар Top Solder по всі площі екрану. Це зроблено, щоб мінімізувати вплив паяльної маски на

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468343.001 ПЗ

Лис
40

електромагнітні характеристики фільтра, що знаходиться під екраном (рисунок 5.13).

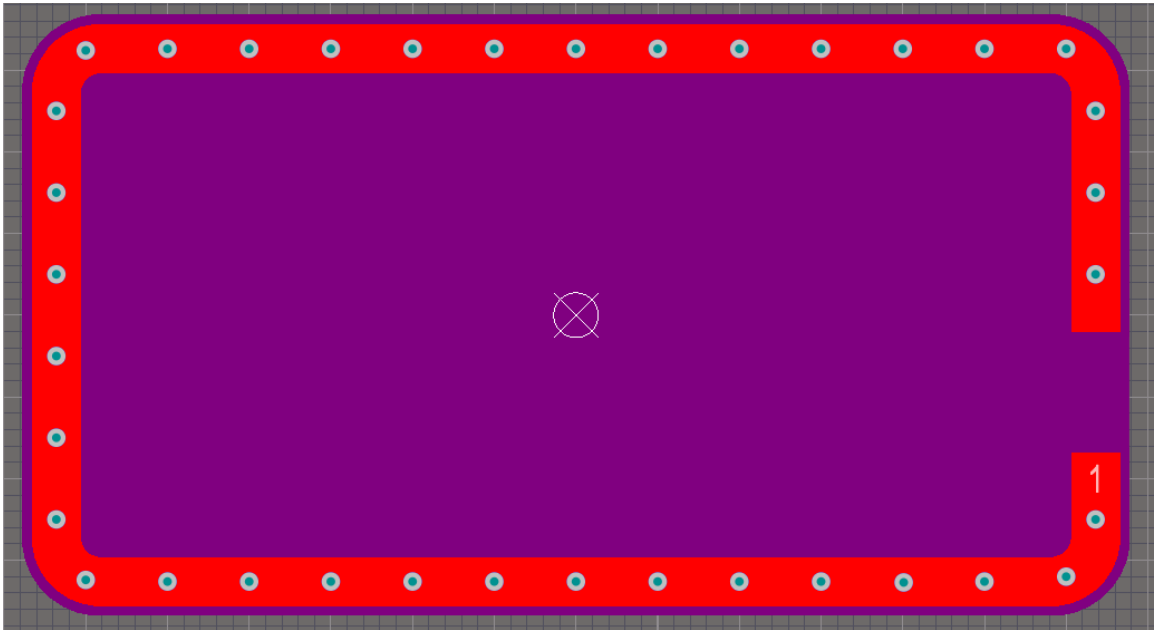


Рисунок 5.13 — Footprint кріпильної рамки екрану

У таблиці 5.1 зображена повна бібліотека елементів, їх контактних майданчиків та 3D моделей.

Таблиця 5.1 — Бібліотека компонентів

Найменування	Графічне позначення	Контактний майданчик	3D модель
RCG040233K0JNED			
QPF4506B			
GRT033C81C104KE01J			

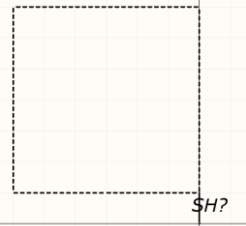
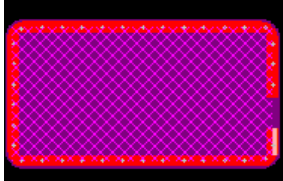
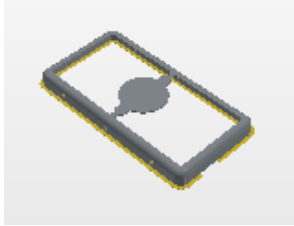
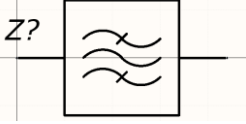
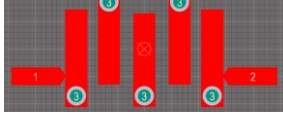
Найменування	Графічне позначення	Контактний майданчик	3D модель																								
GRM0335C1H102GE01D																											
GRM0335C1E330FA01D																											
GRM0335C1E101FA01D																											
GRM033R61C105ME15D																											
GCM21BM8EH475KE08 L																											
G846A061002T2HR	<table><tr><th colspan="3">X? </th></tr><tr><th>Коло</th><th>Конт</th><th></th></tr><tr><td>VDET</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>C1</td><td>2</td><td>2</td></tr><tr><td>CO</td><td>3</td><td>3</td></tr><tr><td>PA_EN</td><td>4</td><td>4</td></tr><tr><td>VDD/VCC</td><td>5</td><td>5</td></tr><tr><td>GND</td><td>6</td><td>6</td></tr></table>	X?			Коло	Конт		VDET	1	1	C1	2	2	CO	3	3	PA_EN	4	4	VDD/VCC	5	5	GND	6	6		
X?																											
Коло	Конт																										
VDET	1	1																									
C1	2	2																									
CO	3	3																									
PA_EN	4	4																									
VDD/VCC	5	5																									
GND	6	6																									
734205030, SMP-MAX Jack	<table><tr><th colspan="3">X? SMP-MAX</th></tr><tr><th>Коло</th><th>Конт</th><th></th></tr><tr><td>Signal</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>GND</td><td>2</td><td>2</td></tr></table>	X? SMP-MAX			Коло	Конт		Signal	1	1	GND	2	2														
X? SMP-MAX																											
Коло	Конт																										
Signal	1	1																									
GND	2	2																									
734130042, SSMCX Jack	<table><tr><th colspan="3">X? SSMCX</th></tr><tr><th>Коло</th><th>Конт</th><th></th></tr><tr><td>Signal</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>GND</td><td>2</td><td>2</td></tr></table>	X? SSMCX			Коло	Конт		Signal	1	1	GND	2	2														
X? SSMCX																											
Коло	Конт																										
Signal	1	1																									
GND	2	2																									

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468343.001 ПЗ

Лис

42

Найменування	Графічне позначення	Контактний майданчик	3D модель
3670321, Shielding Cabinet			
Мікросмушковий смуговий фільтр			

5.5 Схема електрична принципова

За основу схеми електричної було взято підключення типову схему підключення для FEM QPF4506B (рисунок 5.14).

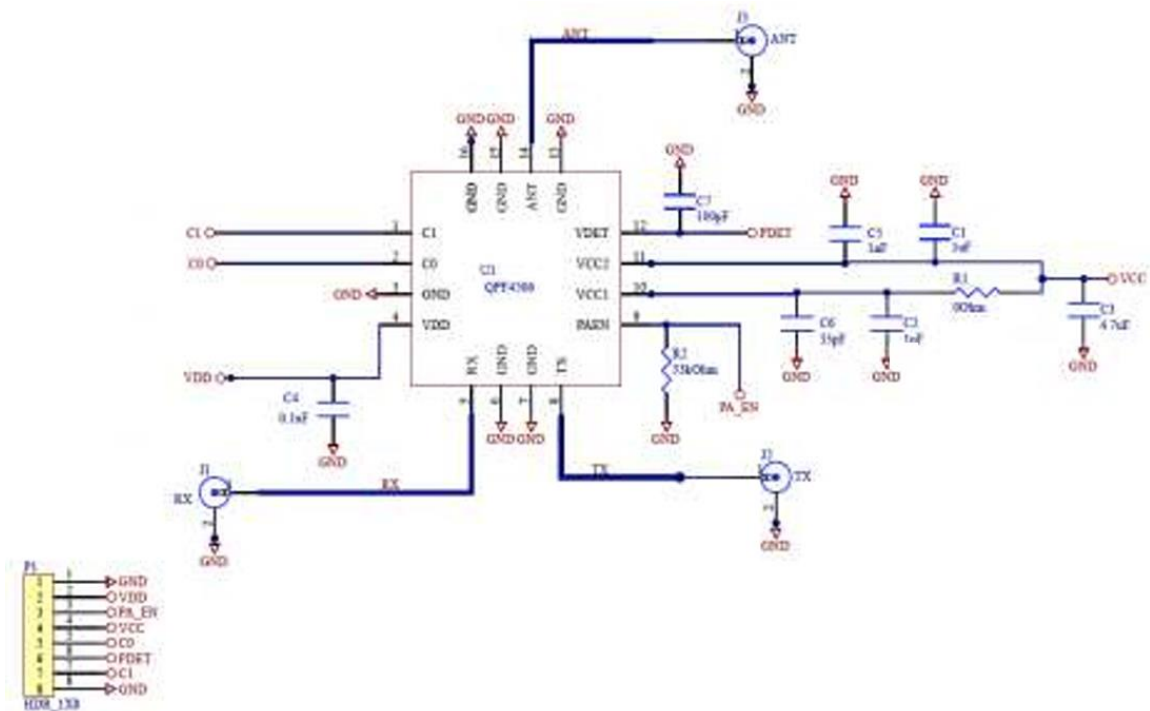


Рисунок 5.14 — Типова схема включення FEM QPF4506B

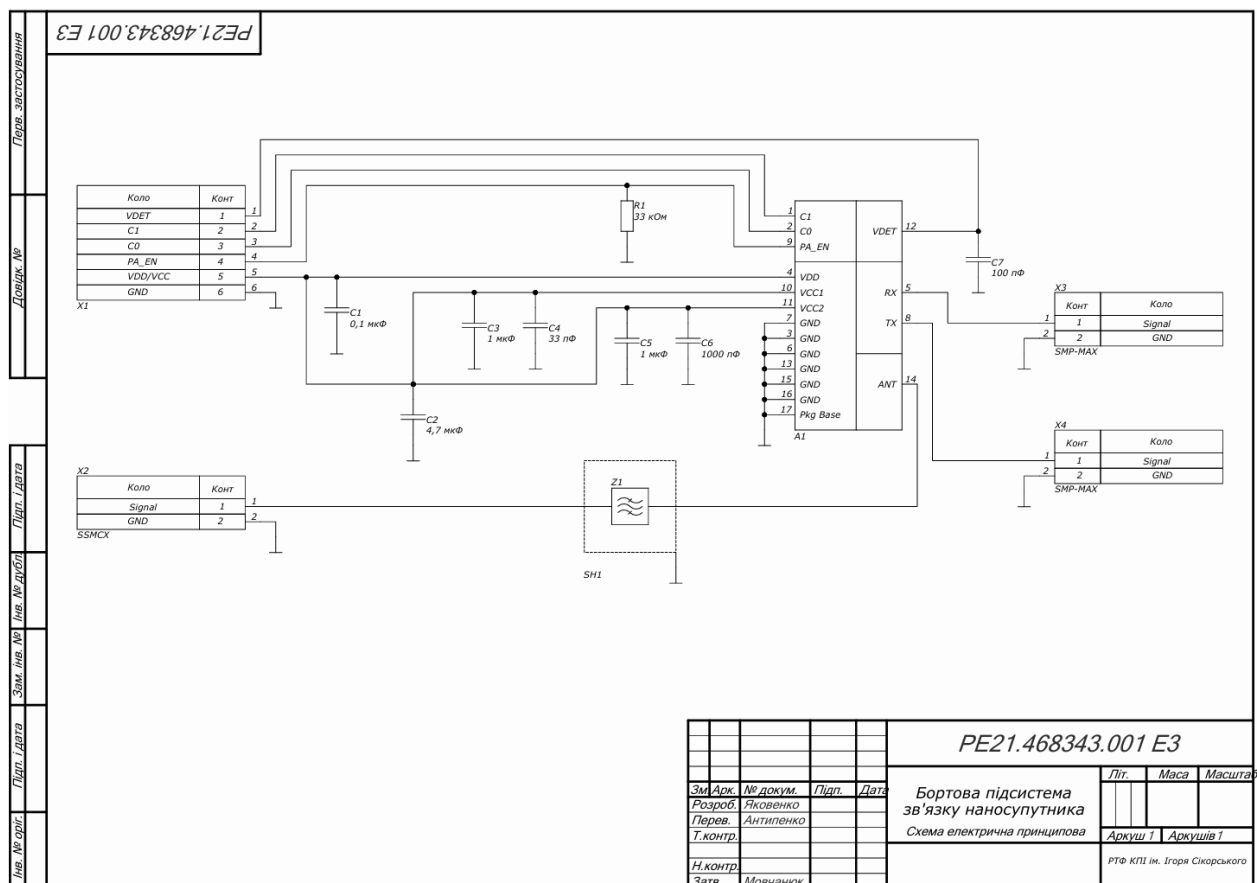


Рисунок 5.15 — Розроблена схема електрична принципова

Роз'єм X1 призначений для подачі живлення на для FEM (VDD/VCC) та підключення сигналів керування (C1, C0, PA_EN), що забезпечують перемикання режимів роботи пристрою. Вивід VDET — це вихід детектора потужності. Згідно з даташитом при потужності вихідного сигналу у 10 dBm — напруга на виводі становить 0,4 В, при потужності вихідного сигналу у 25 dBm — 0,84 В.

Режим роботи пристрою визначається станом керувальних виводів PA_EN, C0 та C1. Для передачі даних на вивід PA_EN подається високий логічний рівень, а на виводи C0 і C1 — низький. Для приймання даних із використанням малошумного підсилювача (LNA) високий логічний рівень встановлюється на виводі C0, тоді як на виводах PA_EN та C1 підтримується низький рівень. Режим bypass, у якому LNA вимкнений, активується подачею високого логічного рівня на вивід C1.

Logic Truth Table

Mode	State	PA_EN	C0	C1
All Off	1	Low	Low	Low
Transmit	2	High	Low	High
LNA On	3	Low	High	Low
Bypass LNA	4	Low	High	High
Reserved	5	Low	Low	High
Reserved	6	High	Low	Low

Рисунок 5.16 — Таблиця режимів роботи FEM

Роз'єм X2 — роз'єм для підключення антени. Далі сигнал проходить крізь фільтр Z1 і потрапляє до FEM.

Роз'єми X3 та X4 використовуються для підключення до приймача та передавача відповідно.

Конденсатори C1 – C6 встановлені для фільтрування живлення, конденсатор C7 — фільтрування сигналу з VDET.

5.6 Задання правил трасування плати

У налаштуваннях для файлу PCB у вікні Design → Classes створюємо класи для доріжок ДП, в залежності від призначення (рисунок 5.16). Клас RF — для високочастотних сигналів, клас VCC/VDD/Sig — для живлення та низькочастотних сигналів.

У вікні Design → Rules → Routing → Width задали значення ширин провідників до кожного класу (рисунок 5.17).

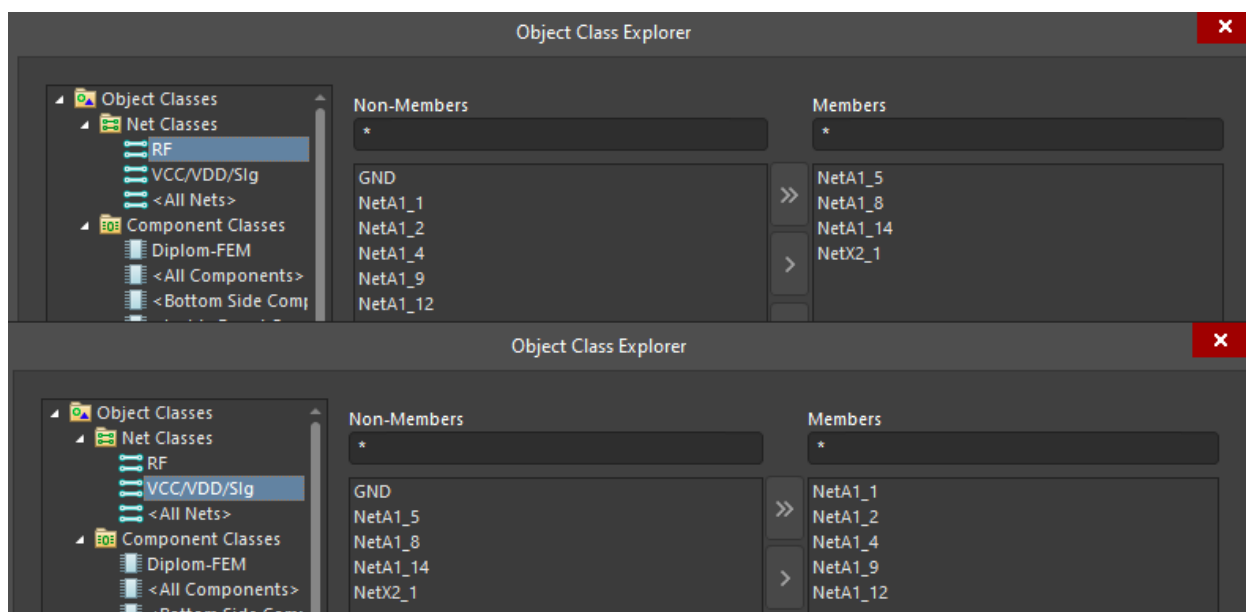


Рисунок 5.17 — Класи електричних ланцюгів

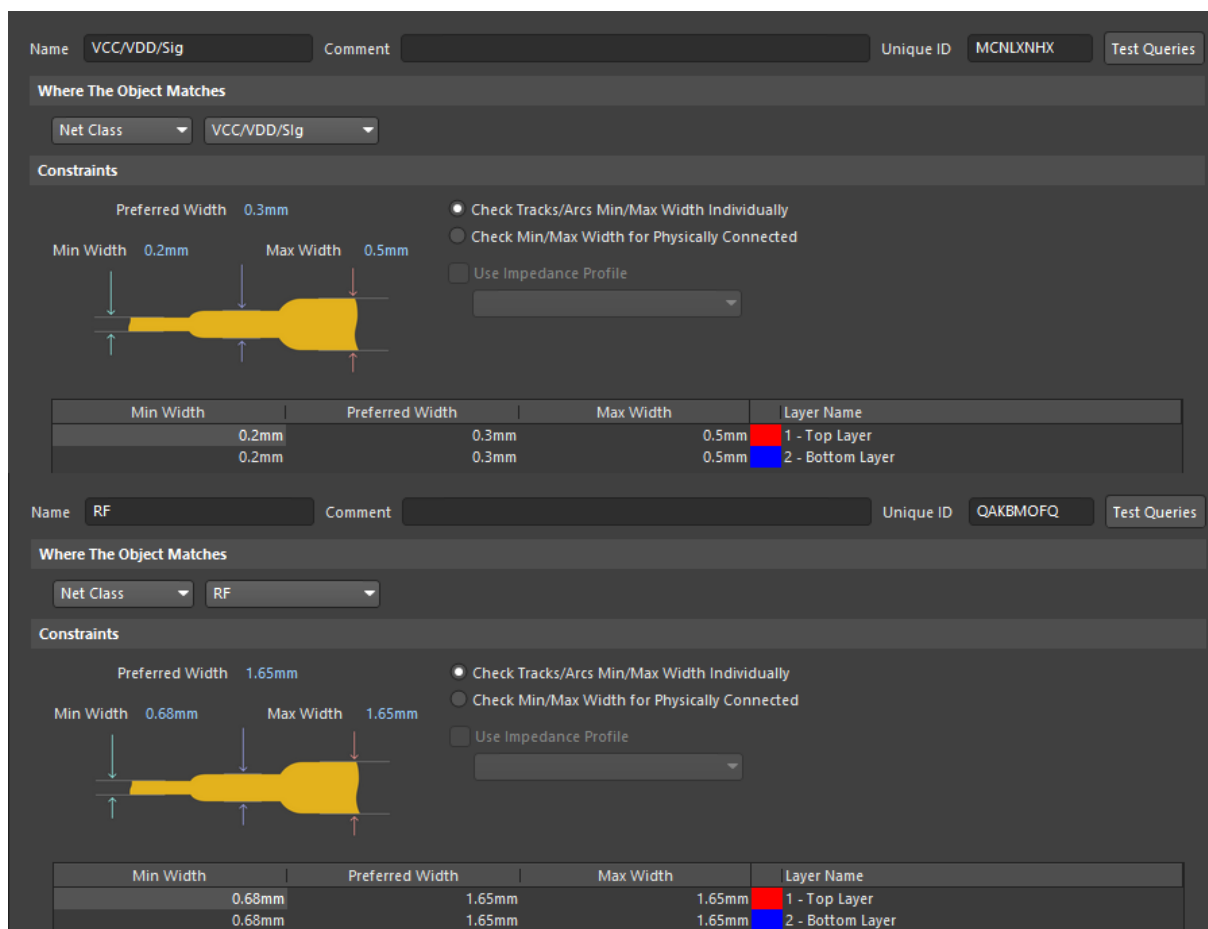


Рисунок 5.18 — Задання ширини провідника в залежності від класу

У вікні Design → Rules задали правила трасування плати згідно з можливостями виробника JLCPCB:

- мінімальна відстань між провідниками рівна 0,1 мм (Electrical → Clearance);
- мінімальний розмір перехідного отвору та його майданчика (Routing → Routing Via Style) — 0,15 мм та 0,25 мм;
- встановлюємо мінімальну відстань до повороту доріжки від SMD компоненту рівну 0,3 мм;
- перевірка, щоб ширина доріжки виявилась не товщою за ширини контактного майданчика (SMT → SMD Neck-Down)
- дозвіл підключати доріжку до SMD компоненту тільки під кутом 90° (SMT → SMD Entry → Side);
- на скільки захисна маска віддалена від паду рівна 0,05 мм (Mask → SolderMaskExpansion);

- тип підключення перехідного отвору до полігону — пряме підключення (Plane → Polygon Connect Style → PolygonConnect);
- мінімальний діаметр отвору — 0,15 мм, а максимальна — діаметр отвору під кріплення — 6,3 мм (Manufacturing → Hole Size);
- мінімальна відстань між отворами — 0,2 мм (Manufacturing → Hole to Hole Clearance);
- значення гарантійного пояску — 0,127 мм (Manufacturing→Board Outline Clearance).

5.7 Проектування друкованої плати

Імпортуємо зміни з проекту до файлу (Design → Import Changes from Project). У шарі Keep-Out за допомогою Keepout → Track створюємо ДП потрібної форми та розміри (50 × 30 мм) (рисунок 5.19).

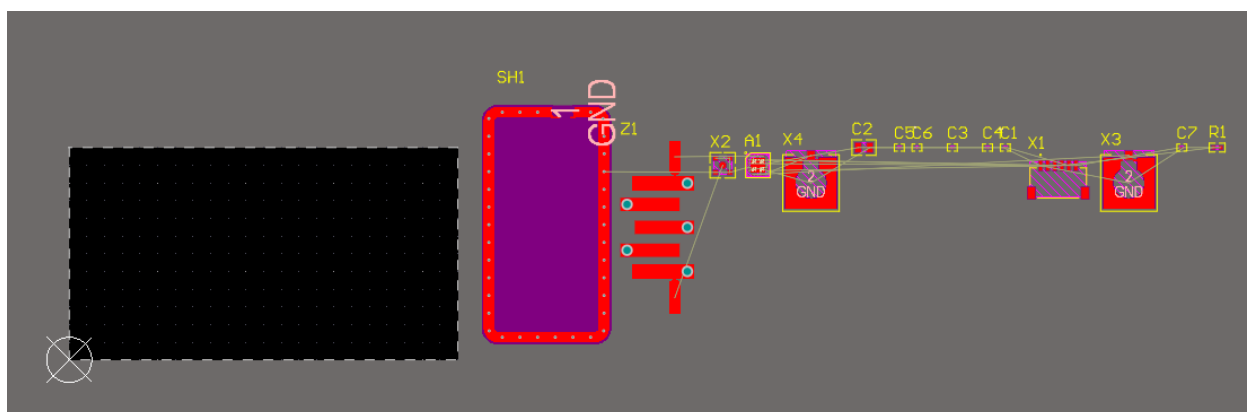


Рисунок 5.19 — Створена ДП, імпортовані footprint

У Design → Layer stack Manager заповнюємо таблицю параметрів ДП (рисунок 5.20).

#	Name	Material	Type	Weight	Thickness	Dk	Df
	Top Overlay		Overlay				
	Top Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.01mm	3.8	
1	Top Layer		Signal	1oz	0.035mm		
	Dielectric 1	RO-4350B	Dielectric		0.76mm	3.66	
2	Bottom Layer		Signal	1oz	0.035mm		
	Bottom Solder	Solder Resist	Solder Mask		0.01mm	3.8	
	Bottom Overlay		Overlay				

Рисунок 5.20 — Параметри шарів друкованої плати

Під час компонування друкованої плати (рисунок 5.21) елементи з великою кількістю виводів (FEM) розміщувалися в центральній частині плати, що

					<i>PE21.468343.001 ПЗ</i>	Лис
						47
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє спростити трасування провідників та раціонально використати доступний простір. Роз'єми були розташовані на краях плати для забезпечення зручного доступу під час підключення зовнішніх пристроїв.

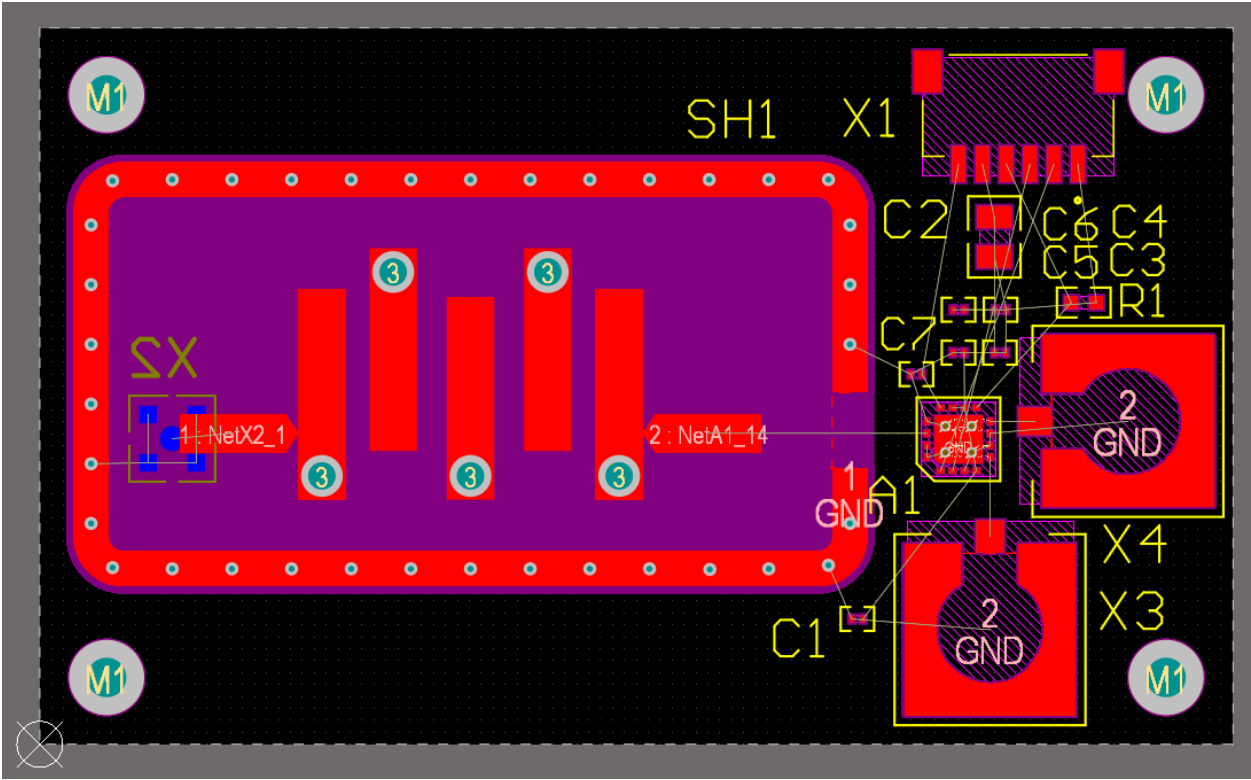


Рисунок 5.21 — Компонування плати

Для реалізації плавних переходів між високочастотними мікросмужковими лініями різної ширини використовувалися об'єкти Solid Region, за допомогою яких формувалися конічні переходи (taper), які забезпечують мінімізацію втрат і відбиттів сигналу. Було додані металізовані отвори для кріплення плати під гвинт M1,5 (діаметр отворів 1,7 мм).

Для підключення спільного провідника (GND) до всіх елементів плати використовували Polygon Pour для обох шарів металізації. По всій площі друкованої плати були розміщені перехідні отвори, що з'єднують заземлювальні полігони різних шарів (Tools → Via Stitching/Shielding → Add Stitching to Net). Уздовж високочастотних трактів було реалізовано ряд заземлених перехідних отворів (via fence). Via fence забезпечує екранування ліній передачі, зменшує рівень електромагнітного випромінювання та взаємного впливу між вузлами, а також покращує з'єднання заземлювальних площин різних шарів друкованої плати.

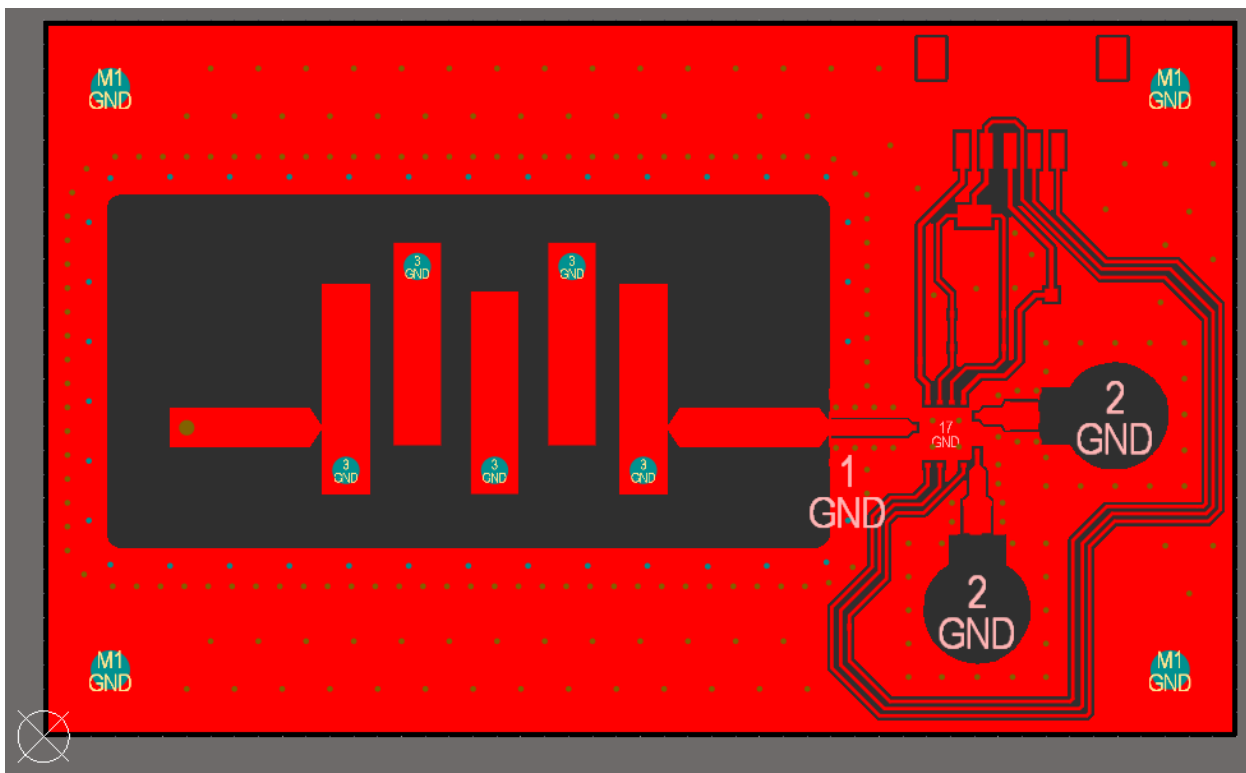


Рисунок 5.22 — Трасування верхнього шару з підключеним полігоном GND

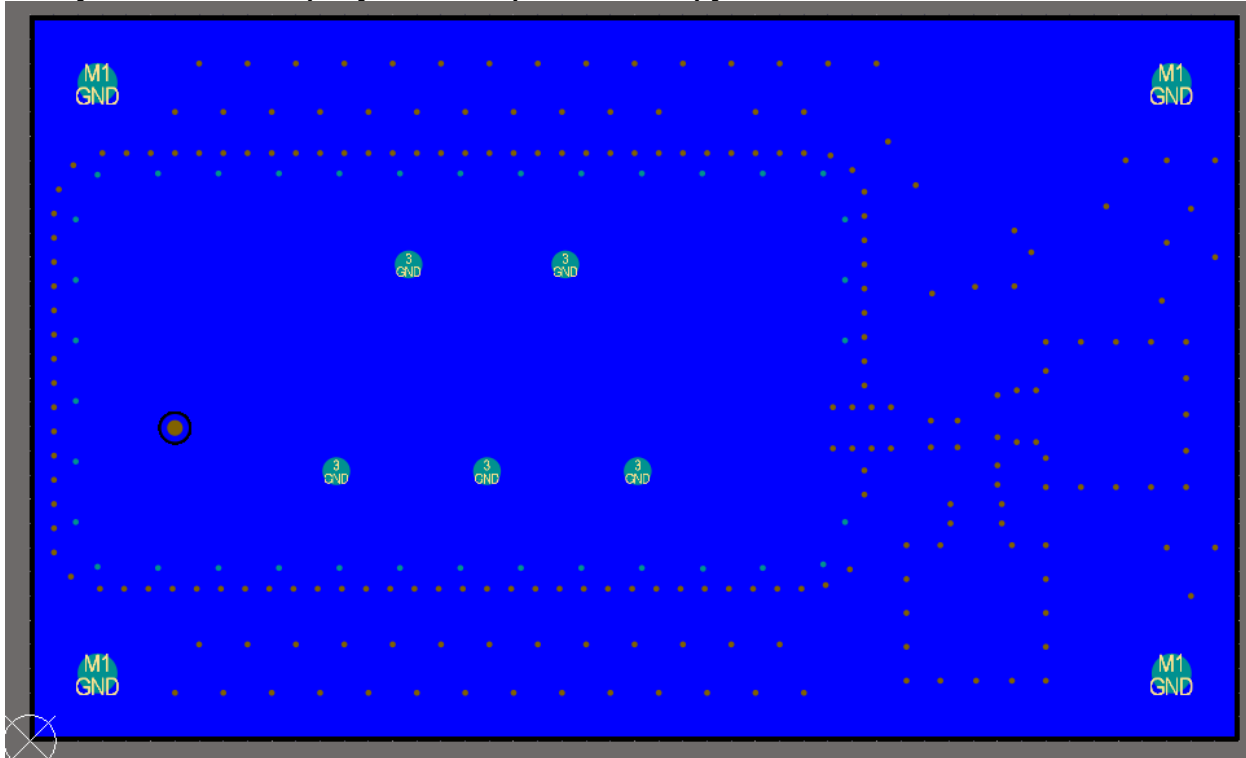


Рисунок 5.23 — Трасування верхнього шару з підключеним полігоном GND

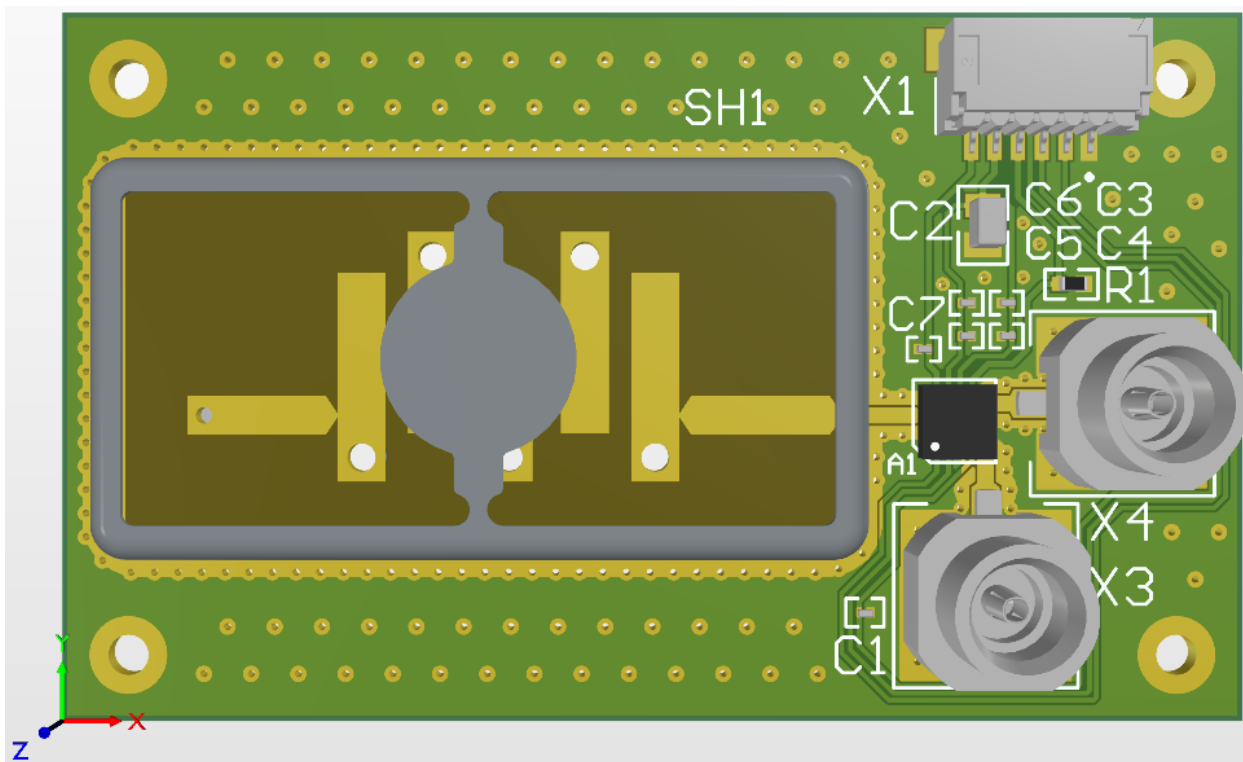


Рисунок 5.24 — 3D модель ДП (вид спереду)

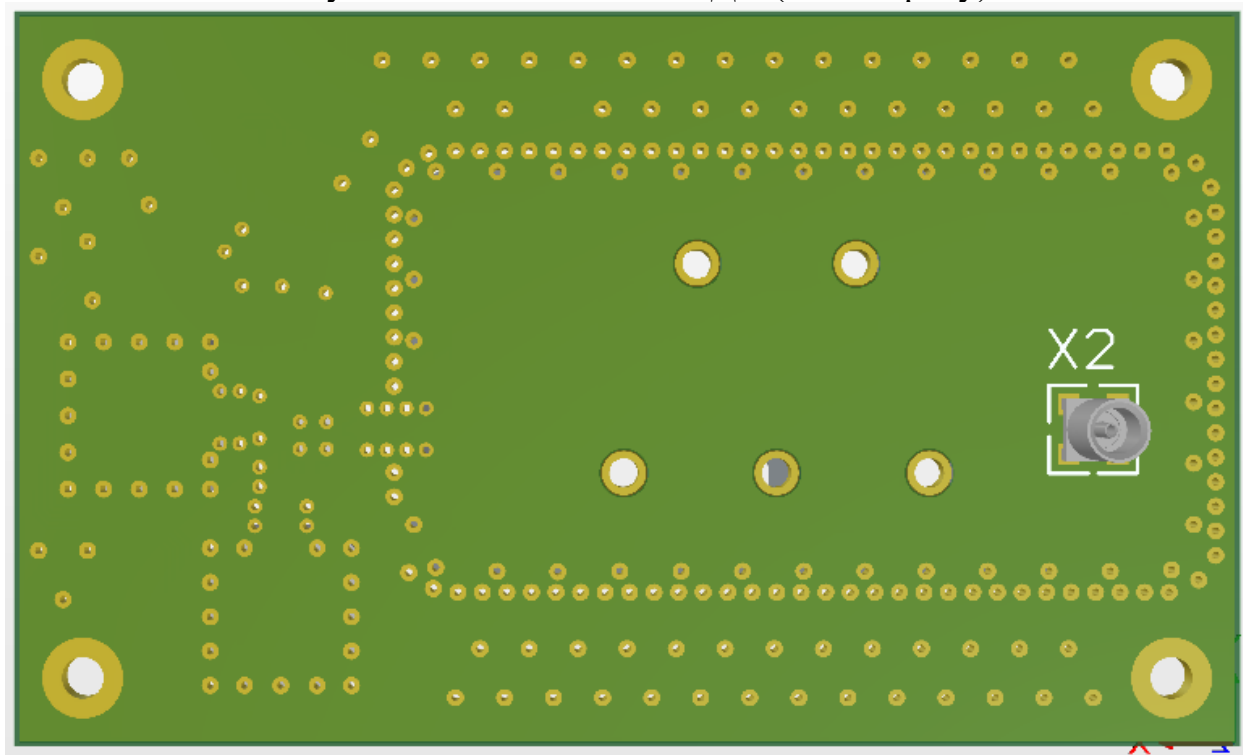


Рисунок 5.25 — 3D модель ДП (вид ззаду)

5.8 Перевірка на помилки трасування

Після трасування перевірили на наявність помилок (Tools → Design Rool Check).

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE21.468343.001 ПЗ

Лис

50

Design Rule Verification Report

Date: 15.06.2026
Time: 22:40:13
Elapsed Time: 00:00:03
Filename: [D:\Altium_proj\Diplom\PCB_Diplom_PcbDoc](#)

Warnings: 0
Rule Violations: 0

Summary

Warnings	Count
Total	0

Рисунок 5.26 — Помилки трасування

З рисунку 5.26 бачимо, що помилки трасування відсутні.

					РЕ21.468343.001 ПЗ	Лис
						51
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проєкту розроблено бортова підсистема міжсупутникового зв'язку нестабілізованого наносупутника, який працює в сузір'ї, являє собою радіочастотний модуль для роботи в С-діапазоні частот. Вирішено ключові завдання проєкту: проведено аналіз сучасних технічних рішень, обрано оптимальну елементну базу, спроектовано та оптимізовано критичний вузол — смуговий мікросмужковий фільтр, розроблено принципову електричну схему та топологію друкованої плати з урахуванням височастотних вимог.

Основна увага в роботі приділялася проєктуванню смугового фільтра, що забезпечує частотну селекцію сигналу. Процес розробки фільтру був багатетапним:

- первинний синтез та моделювання за допомогою онлайн-калькулятора. На початковому етапі було виконано попередній розрахунок фільтру типу Interdigital 5-го порядку. Це дозволило швидко оцінити можливість реалізації та отримати початкову топологію.
- моделювання у AWR Design Environment. Використання вбудованого Wizard Filter Synthesis забезпечило більш точне моделювання з урахуванням параметрів реальної підкладки Rogers RO4350B. На цьому етапі було проведено первинну оптимізацію геометричних розмірів резонаторів та зв'язків між ними для досягнення цільових показників прямих та зворотних та втрат у смузі пропускання.
- електромагнітний аналіз фільтру. Найбільш критичним для досягнення фізичної реалізованості фільтру стало проведення електромагнітного аналізу в модулі AXIEM. Цей етап дозволив врахувати паразитні зв'язки між усіма елементами структури, вплив товщини провідників, втрати в діелектрику та металізації, а також геометричні ефекти (відкритий кінець мікросмужкової лінії, мікросмужковий трійник), які не враховуються при спрощеному моделюванні. Виявлене після ЕМ-аналізу зміщення центральної частоти та погіршення

					<i>PE21.468343.001 ПЗ</i>	Лис
						52
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристик було скориговано за допомогою фінальної оптимізації геометричних параметрів (довжин, ширин резонаторів та відстаней між ними).

В результаті всього циклу проектування було отримано смуговий фільтр з наступними параметрами:

- смуга пропускання на рівні -3 дБ складає $5,15 - 5,925$ ГГц;
- Порядок фільтра: 5;
- Зворотні втрати та КСХ у смузі пропускання: до -10 дБ (що забезпечує узгодження не гірше, ніж вимагалось технічним завданням).

Отримана топологія фільтру була інтегрована в загальну структуру друкованої плати. При розробці ДП було розраховано та забезпечено узгоджений хвильовий опір 50 Ом для всіх високочастотних трас за допомогою мікросмужкових та копланарних ліній, впроваджено екранування за допомогою перехідних отворів (via fence) для мінімізації завад, виконано компонування з урахуванням площі ДП (30×50 мм) та вимог до роз'ємів (SSMCX та SMP-MAX). Обраний типорозмір плати 30×50 мм є компактним і достатнім для реалізації міжплатного з'єднання (board-to-board) із патч-антенною, що конструктивно передбачено технічним завданням. Розроблена плата повністю відповідає технологічним можливостям виробника JLCPCB та перевірена на відсутність помилок трасування.

Розроблений RF-модуль є готовим компонентом для бортової системи міжсупутникового зв'язку нестабілізованого наносупутника, що працює у складі сузір'я. Він характеризується низьким енергоспоживанням, стабільністю параметрів у робочому діапазоні температур та забезпечує необхідний рівень підсилення та вихідної потужності згідно з технічним завданням. Результати проєкту можуть бути використані для створення повноцінного супутникового модуля зв'язку.

					<i>PE21.468343.001 ПЗ</i>	Лис
						53
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. GOMSpace Nanocom Link S [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://gomspace.com/product/nanocom-link-s/>
2. GOMSpace NanoCom AX2150 [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://gomspace.com/product/nanocom-ax2150/>
3. QPB9850 [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://www.qorvo.com/products/p/QPB9850#documents>
4. QPF4506B [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/QRVO/QRVO-S-A0008532432/QRVO-S-A0008532432-1.pdf?hkey=CECEF36DEECDDED6468708AAF2E19C0C6>
5. SKY85717-21 [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/SKYS/SKYS-S-A0000710707/SKYS-S-A0000710707-1.pdf?hkey=CECEF36DEECDDED6468708AAF2E19C0C6>
6. SE5007T-R [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: https://eu.mouser.com/datasheet/3/564/1/SE5007T_DS.pdf
7. QPF7552SR [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: https://eu.mouser.com/datasheet/3/1081/1/QPF7552_Data_Sheet_Brief.pdf
8. QPF4657 [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://www.qorvo.com/products/p/QPF4657#documents>
9. Impedance Calculation [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: https://www.pcbway.com/pcb_prototype/impedance_calculator.html
10. Standard FR4 TG135 Datasheet [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: https://www.casa.co.nz/electrics/Fuses/44A-Laminate-FR4TG135_Data_1p.pdf
11. RO4000® Series High Frequency Circuit Materials [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу:

					PE21.468343.001 ПЗ	Лис
						54
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://www.rogerscorp.com/advanced-electronics-solutions/ro4000-series-laminates/ro4350b-laminates>

12.JLCPCB [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://cart.jlpcb.com/quote?stencilLayer=2&stencilWidth=100&stencilLength=100&stencilCounts=5&plateType=1&spm=Jlpcb.Homepage.1010>

13.Microstrip Filter Design Tool [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://markimicrowave.com/technical-resources/tools/microstrip-filter-design-tool/>

14.PCB Manufacturing & Assembly Capabilities [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://jlpcb.com/capabilities/pcb-capabilities>

15.MWI Calculator Rogers Corporation [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://www.rogerstechub.com/tools/mwi/index.html?id=00QNv00000YbSWPMA3#>

16.3D планарний ЕМ аналіз [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <https://softprom.com/ru/vendor/cadence/product/axiem>

17.Analyst - simplifies 3D EM analysis based on the finite element method [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: <https://softprom.com/vendor/ni-awr/product/analyst>

18.Вікіпедія, вільна енциклопедія, Друкована плата [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B0_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%82%D0%B0

					<i>PE21.468343.001 ПЗ</i>	Лис
						55
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

ПОГОДЖЕНО

Керівник дипломного проєкту

к.т.н., доцент Антипенко Р.В.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри

к.т.н., доцент Мовчанюк А.В.

Підпис

Дата

Підпис

Дата

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ

«Бортова підсистема міжсупутникового зв'язку наносупутника»

Київ – 2026 року

1. НАЗВА І ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ

Назва дипломного проєкту «Бортова підсистеми міжсупутникового зв'язку наносупутника».

Підставою для виконання є завдання, видане кафедрою прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського. Наказ № ____ від ____

2. ВИКОНАВЦІ

Виконавець — студент групи РЕ-21 Яковенко Дмитро Олексійович

3. МЕТА ВИКОНАННЯ ПРОЕКТУ І ПРИЗНАЧЕННЯ ВИРОБУ

Метою дипломного проєкту є розробка підсистеми міжсупутникового зв'язку для нестабілізованих нанаосупутників, що працюють у сузір'ї. Підсистема включає у себе смуговий фільтр, підсилювач потужності для передачі даних, та малошумний підсилювач — для приймання даних.

4. ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

4.1 Технічні характеристики

Напруга живлення: 5 В.

Діапазон робочих частот: 5,15 ГГц – 5,85 ГГц.

Максимальний струм у режимі передачі: до 400 мА.

Максимальний струм у режимі приймання: до 100 мА.

Підсилення у режимі передачі: більше 25 дБ.

Підсилення у режимі приймання: більше 10 дБ.

Потужність вихідного сигналу: більша 20 дБм.

Узгодження всіх радіочастотних трактів забезпечити на хвильовий опір 50 Ом.

Вимоги до смугового фільтру:

- нерівномірність у смузі пропускання: не гірше 4 дБ;
- зворотні втрати: не більше –10 дБ.

4.2 Вимоги до надійності

Час безвідмовної роботи: 10000 год.

4.3 Вимоги до конструкції

Порти:

- для антени — SSMCX Jack;
- для підключення до приймача та передавача — SMP-MAX Jack.

Повинна бути забезпечена можливість підключення плати до антени за допомогою міжплатного (board-to-board) з'єднання.

Розмір друкованої плати не більше ніж 100×100 мм.

4.ВИМОГИ ДО КОНСЕРВАЦІЇ, ПАКУВАННЯ І МАРКУВАННЯ

Маркування: не передбачено.

Пакування: не передбачено.

Консервація: не передбачено.

5.ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

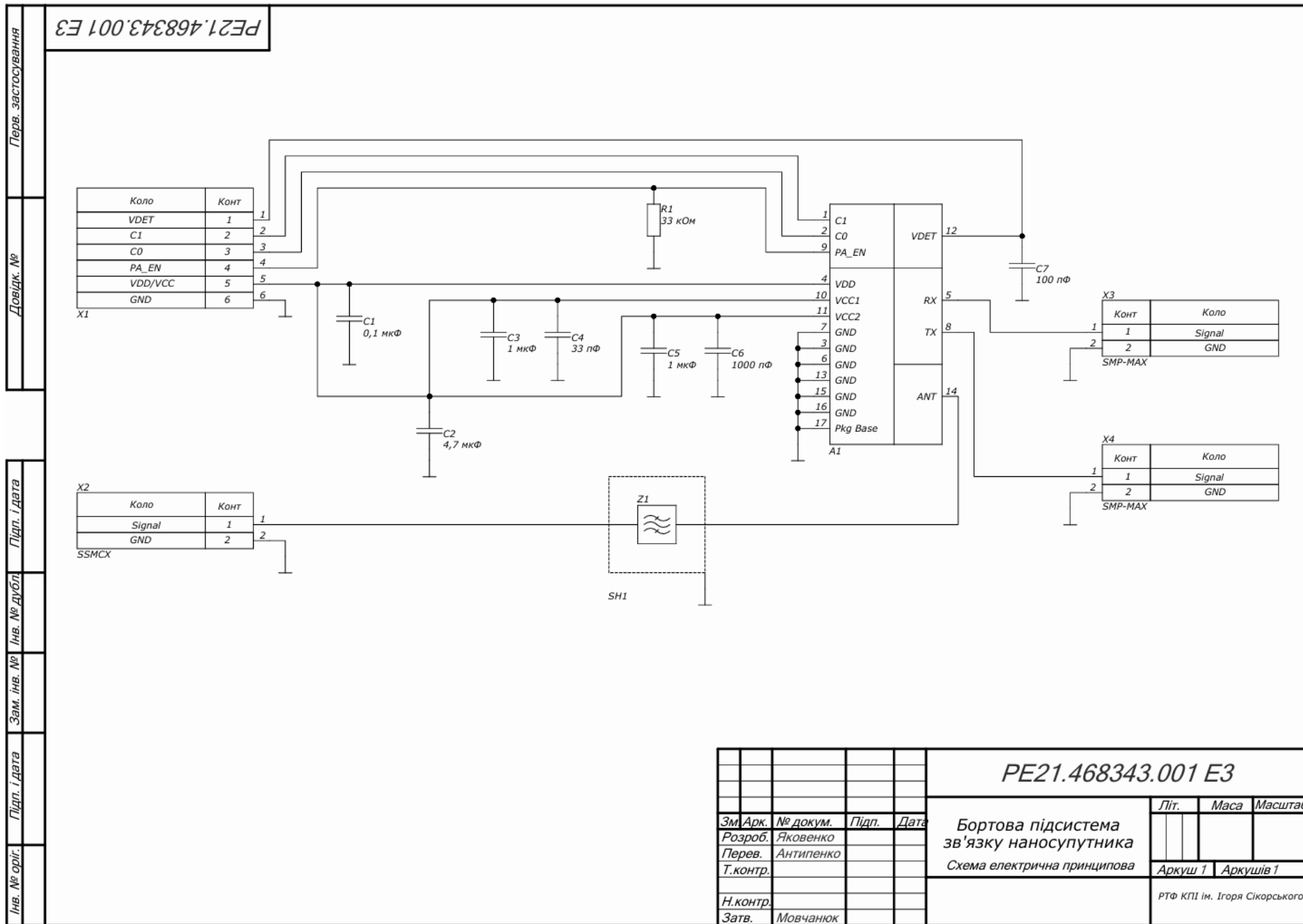
Документація має бути оформлена відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015.

До складу документації повинні входити: пояснювальна записка, структурна схема, схема електрична принципова, перелік елементів, технологічні файли друкованої плати, кресленик друкованої плати, складальний кресленик друкованого вузла.

ДОДАТОК Б. СТРУКТУРНА СХЕМА

ПЕРВ. ЗАСТОСУВАННЯ	ДОВІДК. №	ПІДП. І ДАТА	ІНВ. №	ІНВ. № ДУБЛ.	ЗАМ. ІНВ. №	ПІДП. І ДАТА	ІНВ. №	ІНВ. №																																																																																
PE21.468343.001																																																																																								
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="4">PE21.468343.001</td> <td colspan="2">Літ.</td> <td colspan="2">Маса</td> <td colspan="2">Масштаб</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Бортова підсистема зв'язку наносупутника</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="4">Схема структурна</td> <td colspan="2">Аркуш 1</td> <td colspan="2">Аркушів 1</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="4">Розроб. Яковенко</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="4">Перев. Антипенко</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="4">Т.контр.</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="4">Н.контр.</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="4">Затв. Мовчанюк</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>									PE21.468343.001				Літ.		Маса		Масштаб		Бортова підсистема зв'язку наносупутника										Схема структурна				Аркуш 1		Аркушів 1				Розроб. Яковенко										Перев. Антипенко										Т.контр.										Н.контр.										Затв. Мовчанюк									
PE21.468343.001				Літ.		Маса		Масштаб																																																																																
Бортова підсистема зв'язку наносупутника																																																																																								
Схема структурна				Аркуш 1		Аркушів 1																																																																																		
Розроб. Яковенко																																																																																								
Перев. Антипенко																																																																																								
Т.контр.																																																																																								
Н.контр.																																																																																								
Затв. Мовчанюк																																																																																								

ДОДАТОК В. ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА

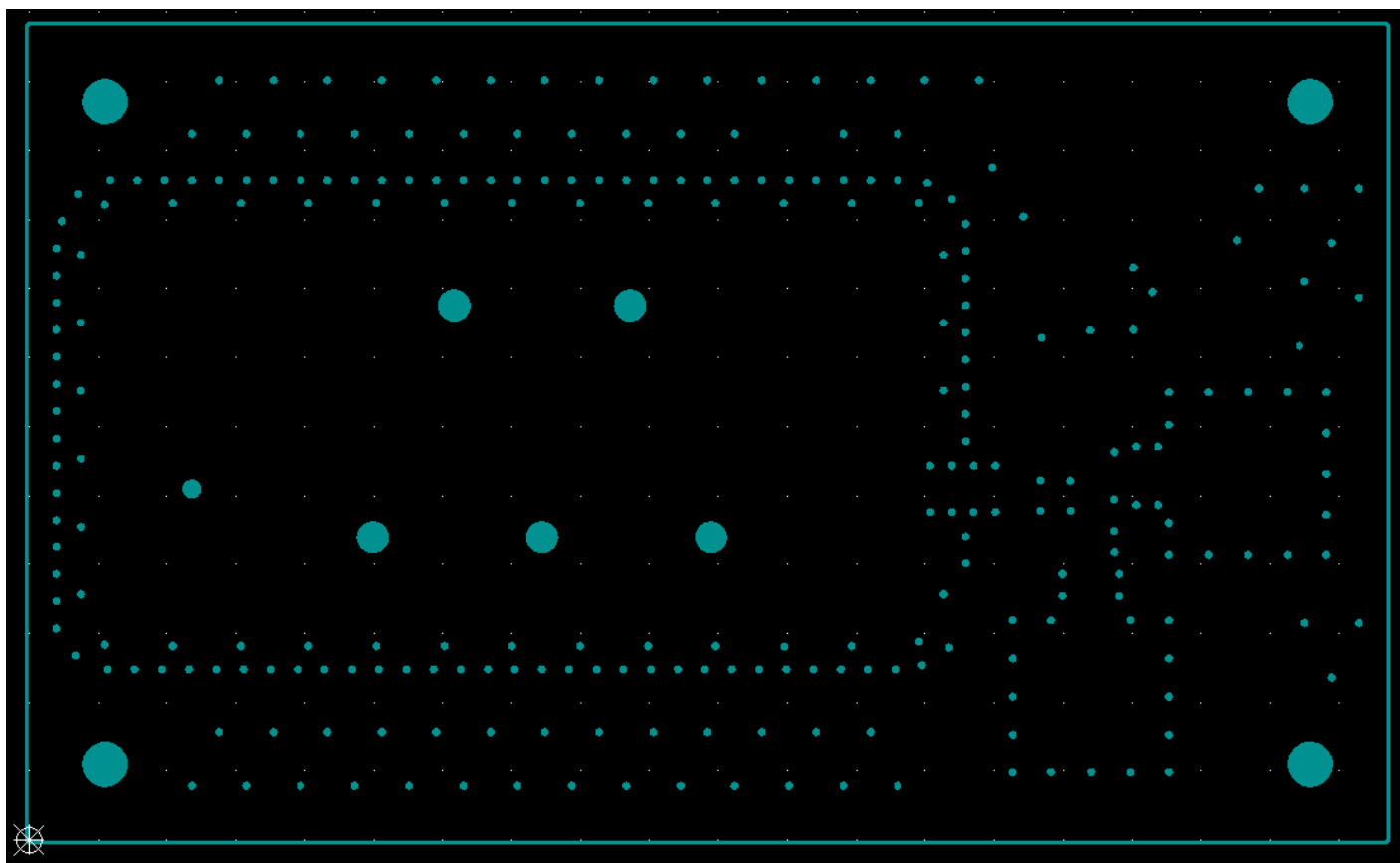


ДОДАТОК Г. ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ

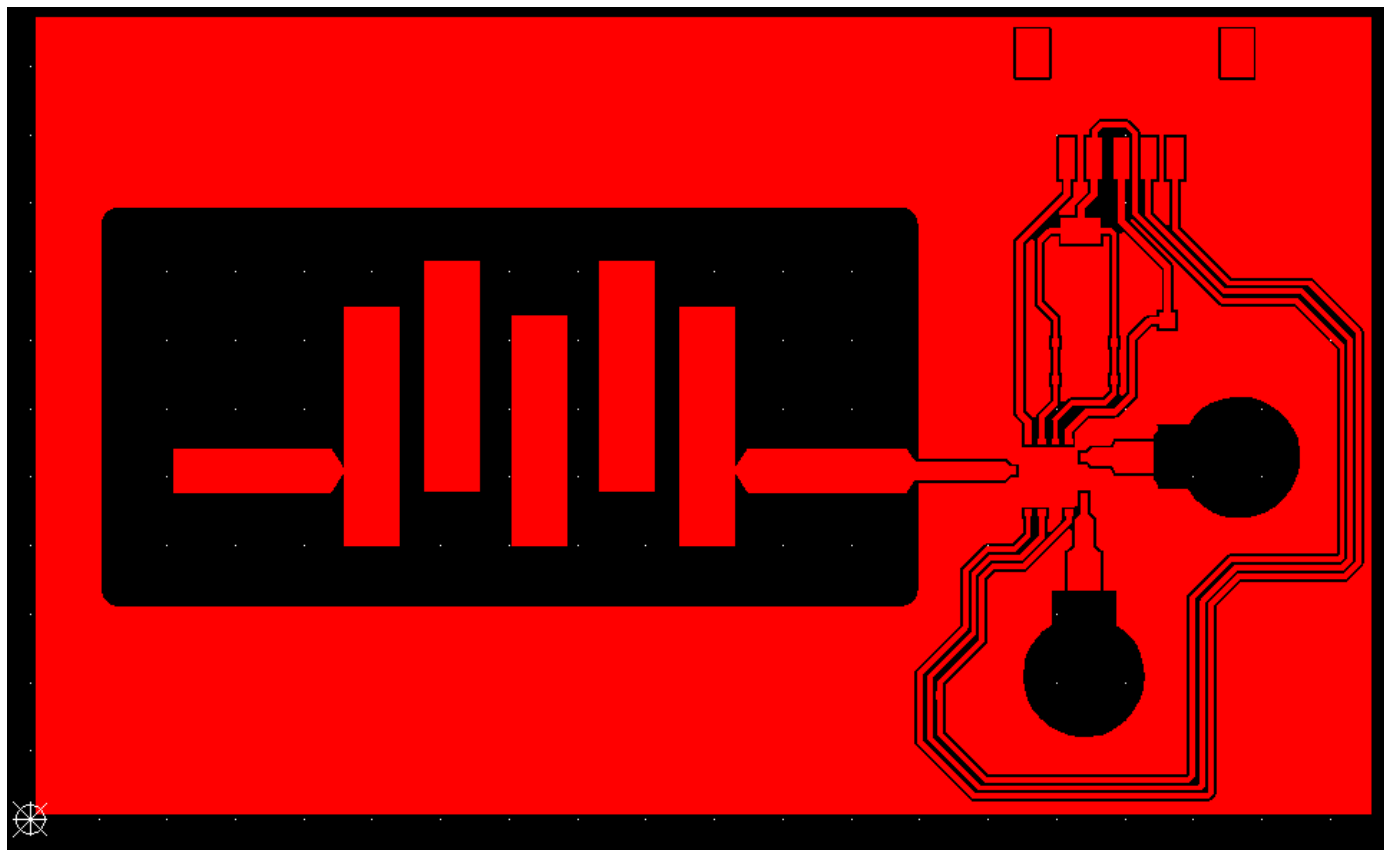
Поз. позн.	Найменування	Кільк.	Примітка	Период застосування	
				Довідковий №	
	<u>FRONT-END модуль</u>				
A1	QPF4506B	1			
	<u>КОНДЕНСАТОРИ</u>				
C1	MLCC - SMD/SMT 0.1 uF 16 VDC 10% 0201 X6S AEC-Q200 Murata Electronics	1			
C2	MLCC SMD/SMT 0805 50VDC 4.7uF 10% X8M AEC-Q200 Murata Electronics	1			
C3	MLCC – SMD/SMT 1 UF 16 VDC 20% 0201 X5R Murata Electronics	1			
C4	MLCC – SMD/SMT 33 PF 25 VDC 1% 0201 C0G (NP0) Murata Electronics	1			
C5	MLCC – SMD/SMT 1 UF 16 VDC 20% 0201 X5R Murata Electronics	1			
C6	MLCC – SMD/SMT 1000 pF 50 VDC 2% 0201 C0G (NP0) Murata Electronics	1			
C7	MLCC – SMD/SMT 100 PF 25 VDC 1% 0201 C0G (NP0) Murata Electronics	1			
	<u>РЕЗИСТОРИ</u>				
R1	THICK FILM RESISTORS – SMD .063WATT 33KOHMS 5% 0402 200PPM VISHAY / DRALORIC	1			
	<u>ЕКРАН</u>				
SH1	Shielding Cabinet, SMT Frame Seamless, 32.1x16.6x2.5mm	1			
	<u>РОЗ'ЄМИ</u>				
X1	AgilLink™ 1.0mm - G846A061002T2HR	1			
X2	SSMCX Jack, Straight, Surface Mount, Brass Body, Gold (Au) Plated, One Piece Per Bag 50 Ohms	1			
X3, X4	SMP-MAX Jack, Straight, Detent, PCB Receptacle, Surface Mount, One Piece Per Bag, 50 Ohms	1			
РЕ21.468343.001.ПЕЗ				Зм.	Арк.
				№ докум.	Підпис
Інв. № орг.	Розроб.	Яковенко			
	Перевір	Антипенко			
	Т.контр				
	Н.конт				
	Затв.	Мовчанюк			
Бортова система зв'язку наносупутника Перелік елементів				Літера	Аркуш
					1
				РТФ КПІ ім. Ігоря Сікорського	

ДОДАТОК Д. ТЕХНОЛОГІЧНІ ФАЙЛИ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

1. NC Drill:



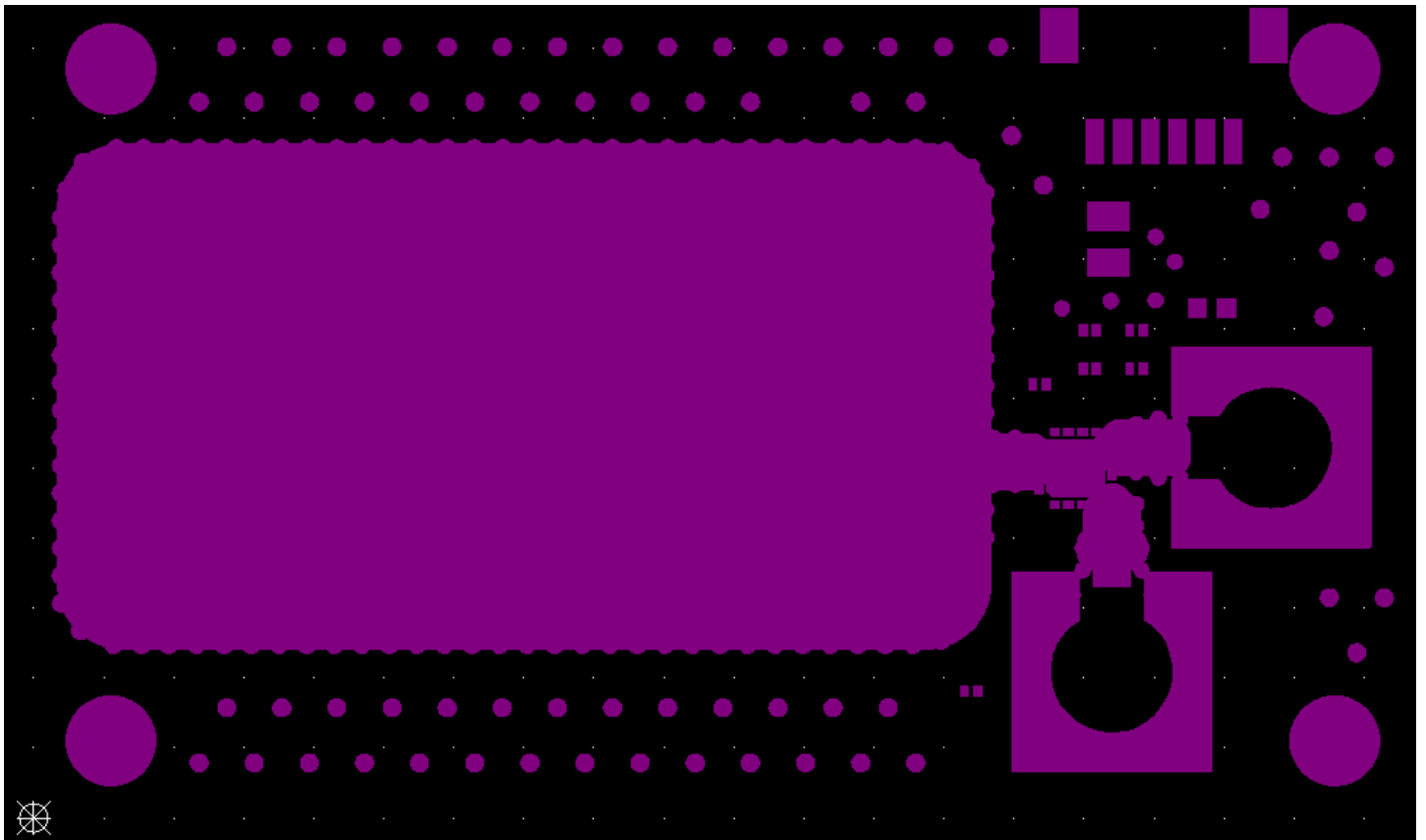
2. Top Layer:



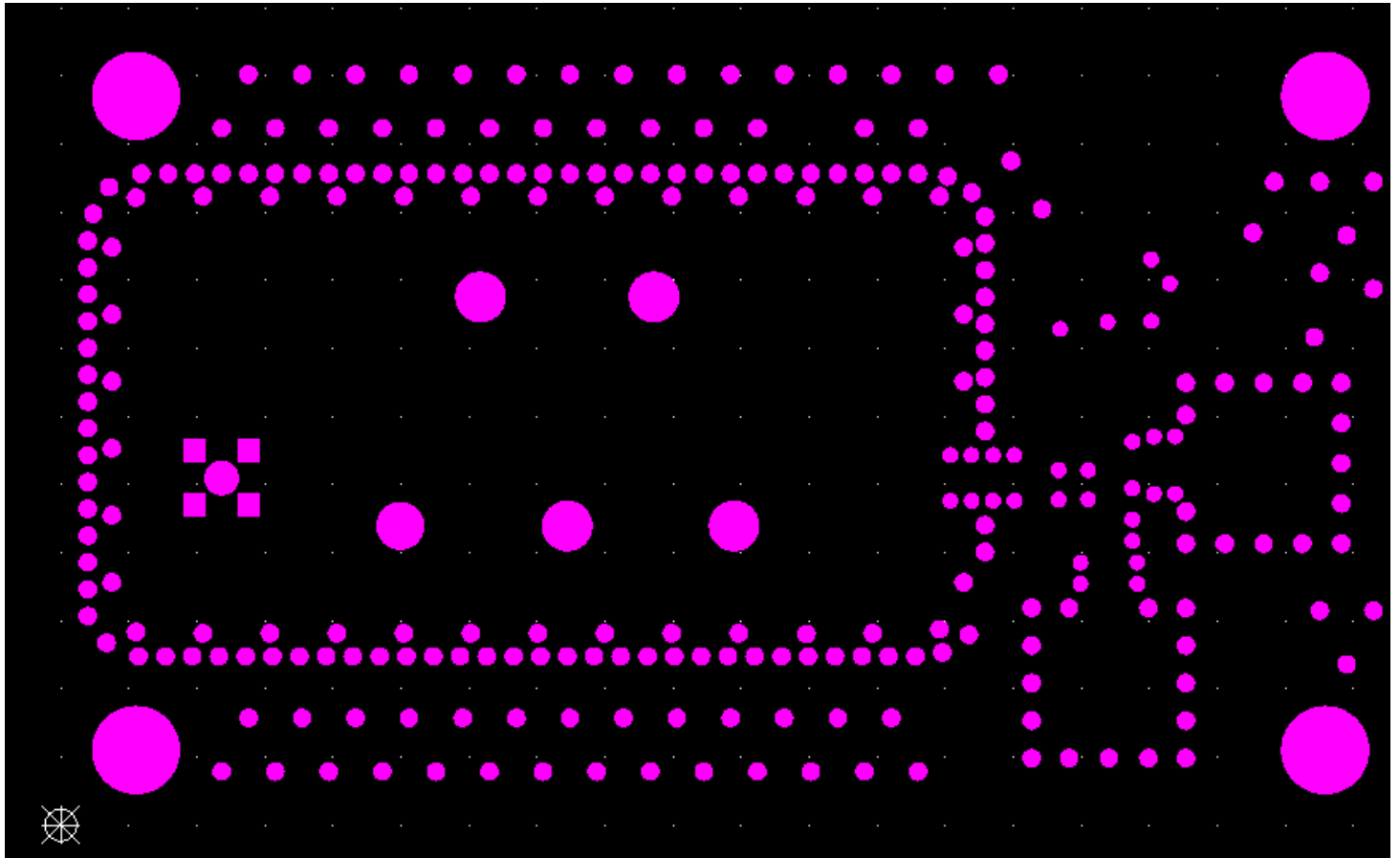
3. Bottom Layer:



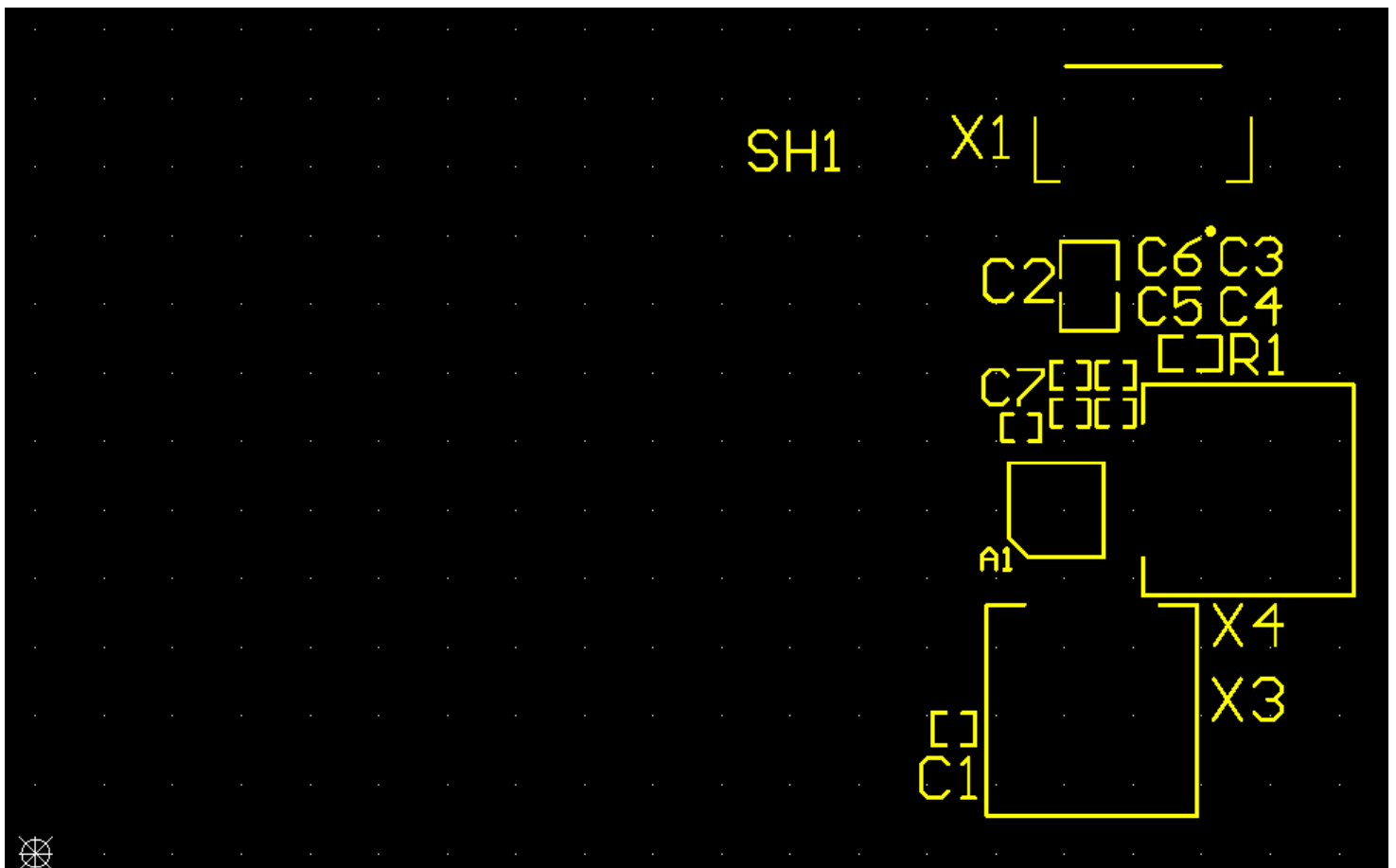
4. Top Solder:



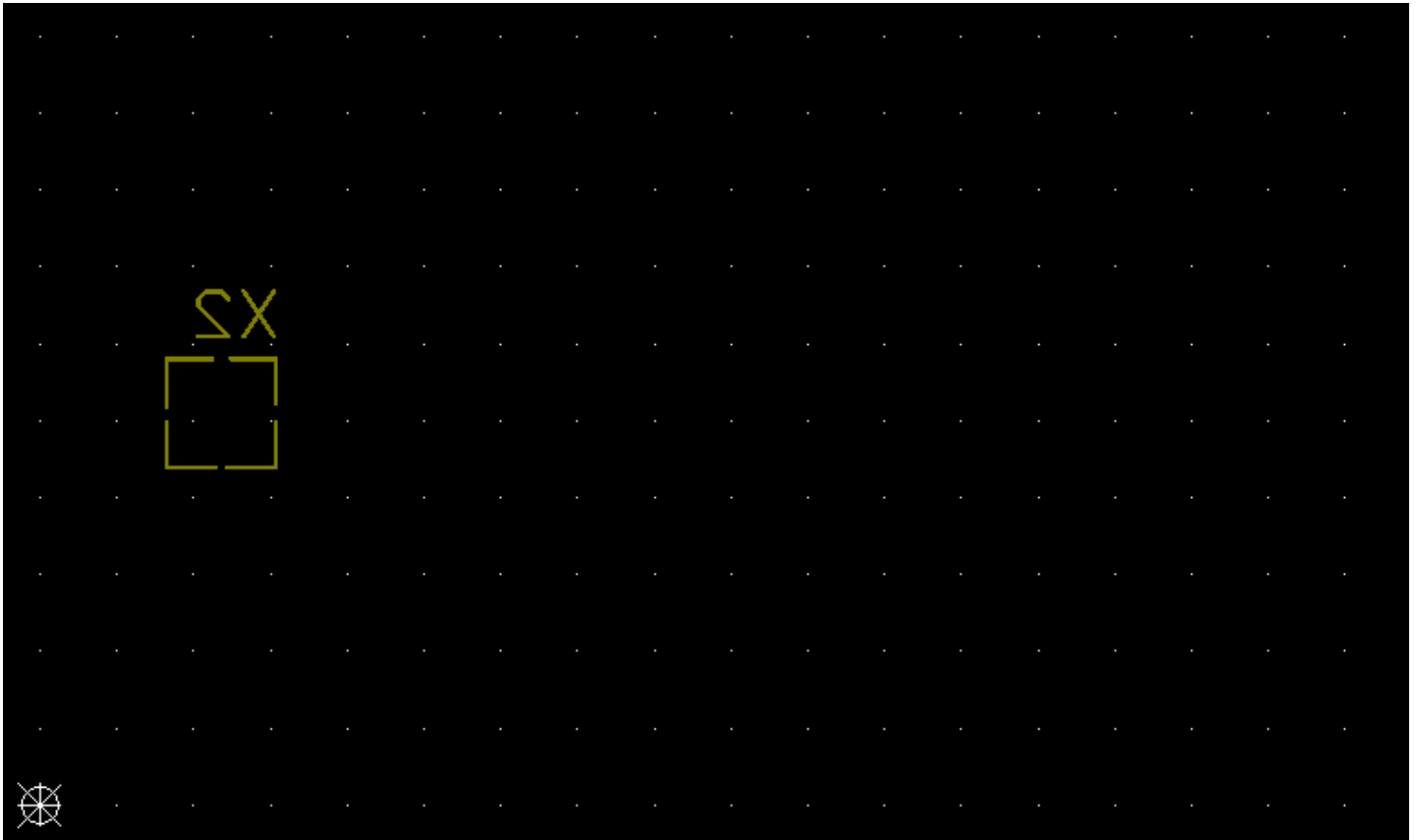
5. Bottom Solder:



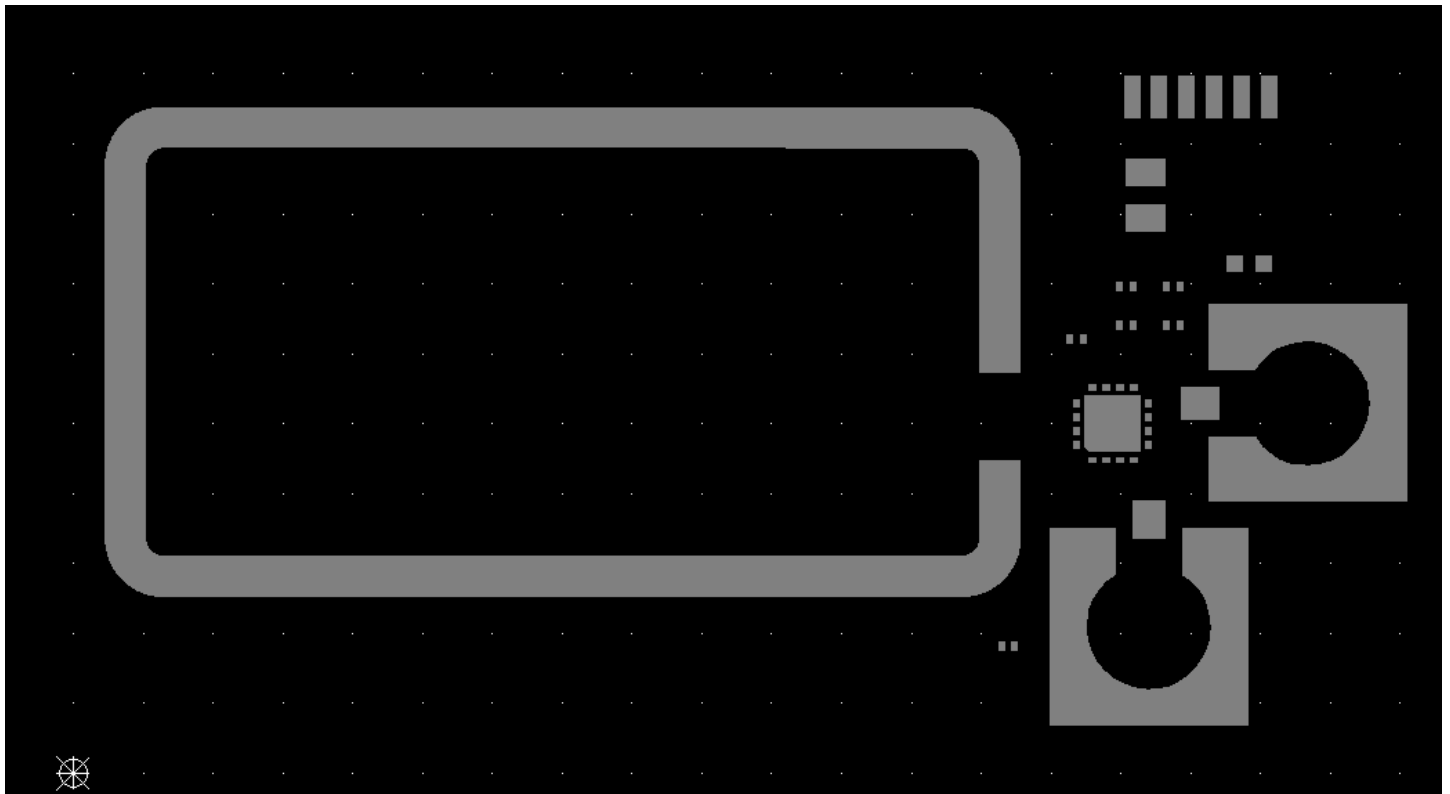
6. Top Overlay:



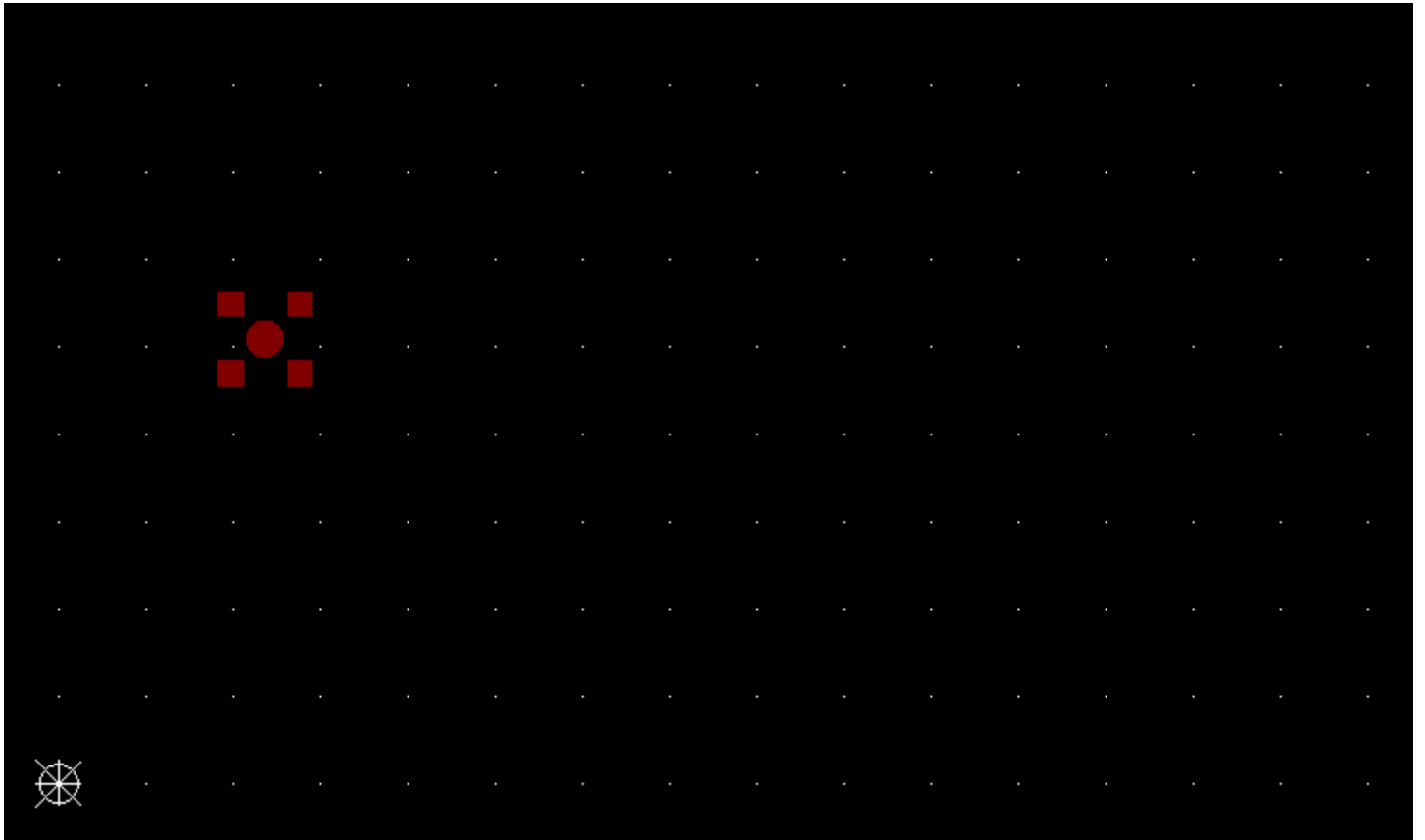
7. Bottom Overlay:



8. Top Paste:



9. Bottom Paste:



ДОДАТОК Е. КРЕСЛЕНИК ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

Перв. застосування

Довідк. №

Підп. і дата

Інв. № орг.

Зам. інв. №

Підп. і дата

Інв. № орг.

PE21.758724.001

✓ Ra 6.3

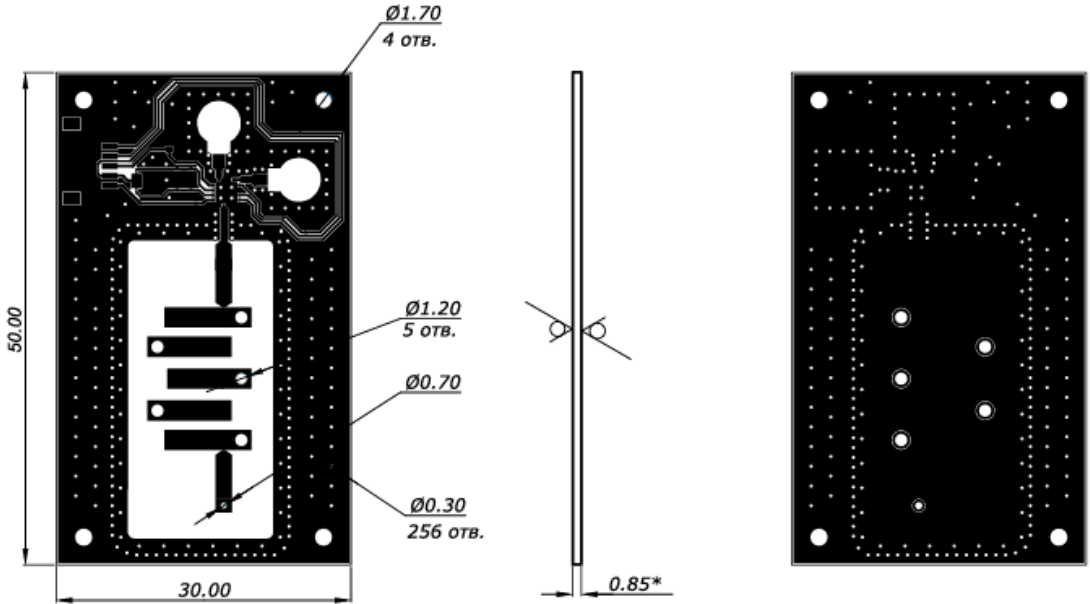


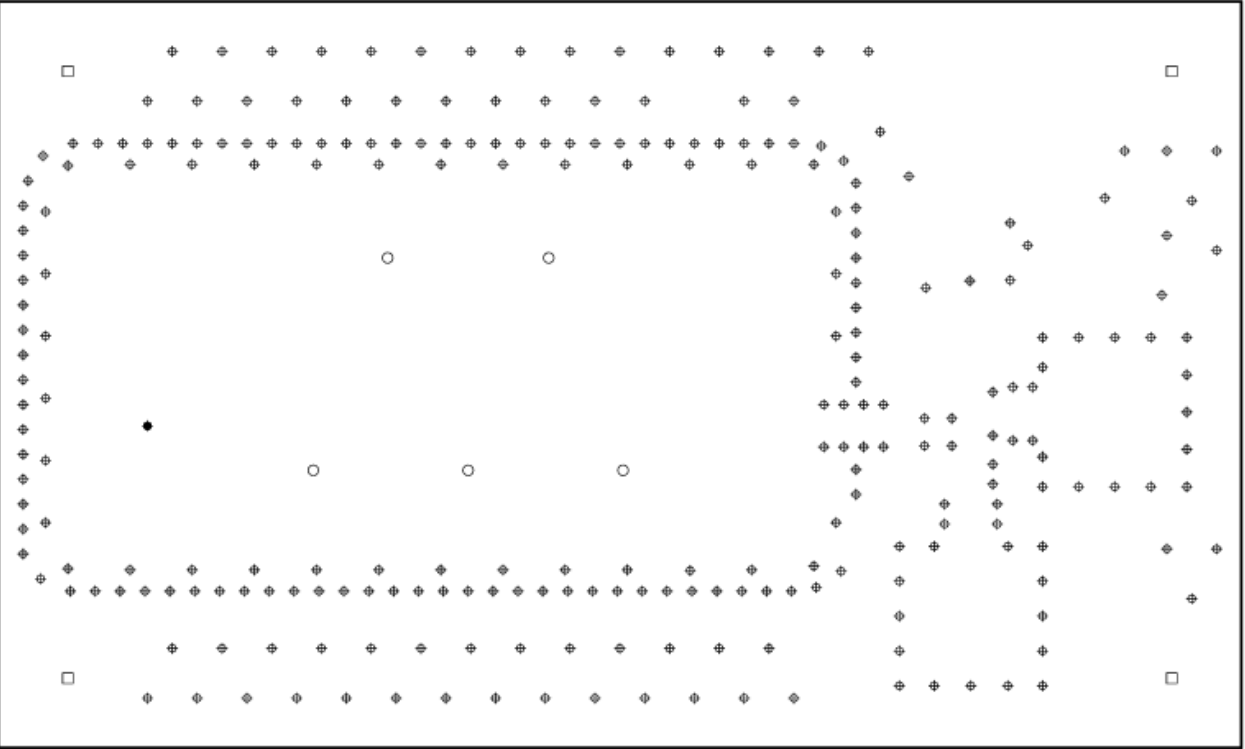
Рисунок 1 - Структура шарів друкованої плати

Material	Layer	Thickness	Dielectric Material	Type	Gerber
	Top Overlay			Legend	GTO
Surface Material	Top Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask	GTS
Copper	Top Layer	0.04mm		Signal	GTL
		0.76mm	RO-4356B	Dielectric	
Copper	Bottom Layer	0.04mm		Signal	GBL
Surface Material	Bottom Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask	GBS
	Bottom Overlay			Legend	GBO
Total thickness: 0.85mm					

- * Розміри для довідок.
- Плату виготовити у відповідності до вимог IPC-6011, клас 1.
- Плату виготовити методом металізації наскрізних отворів.
- Кількість і параметри отворів у відповідності до Таблиці 1 та Додаткового виду А.
- Інформація про структуру шарів друкованої плати наведена на рис. 1.
- При виготовленні плати застосувати технологічні файли:
 - а) Верхній шар провідників PE21.758724.001.GTL
 - б) Нижній шар провідників PE21.758724.001.GBL
 - в) Верхній шар паяльної маски PE21.758724.001.GTS
 - г) Нижній шар паяльної маски PE21.758724.001.GBS
 - д) Верхній шар маркування PE21.758724.001.GTO
 - ж) Нижній шар маркування PE21.758724.001.GBO
 - з) Контур плати PE21.758724.GM
 - є) Координати отворів PE21.758724.001.DRL

PE21.758724.001					
Зм. Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Друкована плата бортової підсистеми зв'язку наносупутника	
Розроб.	Яковенко				
Перевір.	Антипенко			Аркуш 1 Аркушів 2	
І. контр.					
Н. контр.					
Затв.	Мовчанюк			RO4350B 35/35 0.76	
				Лім. Маса Масштаб	
				1:1	
				НТУУ КПІ, РТФ	

Додатковий вид А



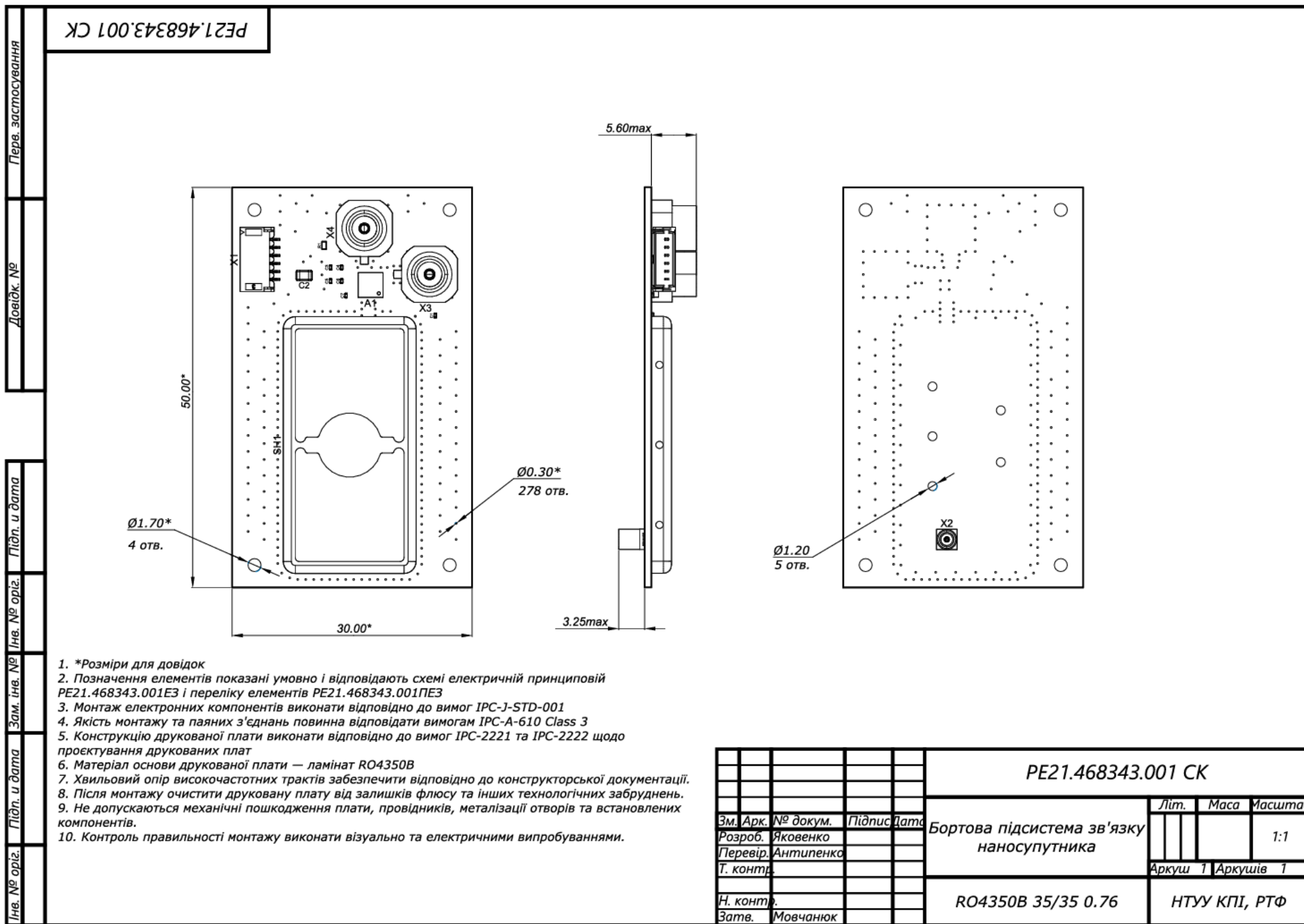
Таблиця 1 - Діаметри отворів

Symbol	Count	Hole Size	Plated
⊕	256	0.30mm	Plated
●	1	0.70mm	Plated
○	5	1.20mm	Plated
□	4	1.70mm	Plated
266 Total			

Інв. № ориг. Підп. і дата
Зам. інв. № Підп. і дата
Інв. № ориг. Підп. і дата

Зм. Арк. № докум. Підп. і дата

ДОДАТОК Є. СКЛАДАЛЬНИЙ КРЕСЛЕНИК ЕЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ



- *Розміри для довідок
- Позначення елементів показані умовно і відповідають схемі електричній принциповій PE21.468343.001ЕЗ і переліку елементів PE21.468343.001ПЕЗ
- Монтаж електронних компонентів виконати відповідно до вимог IPC-J-STD-001
- Якість монтажу та паяних з'єднань повинна відповідати вимогам IPC-A-610 Class 3
- Конструкцію друкованої плати виконати відповідно до вимог IPC-2221 та IPC-2222 щодо проектування друкованих плат
- Матеріал основи друкованої плати — ламінат RO4350B
- Хвильовий опір високочастотних трактів забезпечити відповідно до конструкторської документації.
- Після монтажу очистити друковану плату від залишків флюсу та інших технологічних забруднень.
- Не допускаються механічні пошкодження плати, провідників, металізації отворів та встановлених компонентів.
- Контроль правильності монтажу виконати візуально та електричними випробуваннями.

					PE21.468343.001 СК			
					Бортова підсистема зв'язку наносупутника	Лім.	Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				1:1
Розроб.		Яковенко						
Перевір.		Антипенко						
Т. контр.						Аркуш 1	Аркушів 1	
Н. контр.					RO4350B 35/35 0.76	НТУУ КПІ, РТФ		
Затв.		Мовчанюк						

ДОДАТОК Ж. СПЕЦИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ

Первинне застосуван	Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка		
					Документація				
Довідковий №	A4			PE21.468343.001 СК	Складальний кресленик	1			
	A4			PE21.468343.001 ЕЗ	Схема електрична принципова	1			
	A4			PE21.468343.001 ПЕЗ	Перелік елементів	1			
					Деталі				
	A4			PE21.758724.001	Друкована плата	1			
Підпис і дата									
Зам. Інв. №									
Інв. № дубл.									
Підпис і дата									
Інв. № ориг									
Інв. № ориг	Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	PE21.468343.001			
	Розроб.	Яковенко				Бортова підсистема зв'язку наносупутника	Літера	Аркуш	Аркушів
	Перевір.	Антипенко						1	1
	Т.						НТУУ КПІ, РТФ		
	Н.	*							
Затв.	Мовчанюк								