


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

кафедра РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

“На правах рукопису”
УДК 621.372.54

“До захисту допущено”
Завідувач кафедри РТС
 **Сергій ЖУК**

“12” 12 2024 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
“Радіотехнічні комп’ютеризовані системи”
зі спеціальності **172 “Електронні комунікації та радіотехніка”**
на тему: Підсилювач потужності в субгігагерцовому діапазоні

Виконав: студент 2 курсу, групи РС-31 мп

Новицький Ярослав Артемович

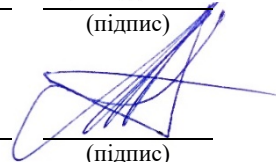


(прізвище, ім’я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник: *Ст.викл., кафедри РТС, PhD*
Мирончук Олександр Юрійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім’я, по батькові)



(підпис)

Рецензент: к.т.н., доц. каф. ПРЕ

Мовчанюк Андрій Валерійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім’я, по батькові)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.



Студент _____
(підпис)

Київ – 2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”


РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра радіотехнічних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
спеціальність 172 “Електронні комунікації та радіотехніка”
Освітньо-професійна програма “Радіотехнічні комп’ютеризовані системи”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТС

 Сергій ЖУК

« 23 » 09 2024 року

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студента

Новицького Ярослава Артемовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Підсилювач потужності в субгігагерцовому
діапазоні

науковий керівник дисертації

Мирончук Олександр Юрійович, ст.викл., PhD

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «08» листопада 2024 р. №5023-с

2. Термін подання студентом дисертації 12 грудня 2024р.
3. Об'єкт дослідження: підсилювач потужності у субгігагерцовому діапазоні частот.
4. Вихідні дані: підсилювач субгігагерцового діапазону, діапазон частот від 150МГц до 1ГГц, напруга живлення 5В, коефіцієнт корисної дії не менше 35%.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Аналіз актуальності проблеми 2. Вивчення аналогів на ринку 3. Розробка технічного завдання 4. Проектування друкованої плати 5. Тестування та аналіз характеристик
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Друкована плата, презентація.
7. Орієнтовний перелік публікацій:

8. Консультанти розділів дисертації: науково-педагогічні працівники радіотехнічного факультету.

9. Дата видачі завдання: 23.09.2024р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	23.09.24 – 29.09.24	Виконано
2	Розробка та аналіз технічного завдання	06.10.24 – 13.10.24	Виконано
3	Опис принципу роботи приладу	14.10.24 – 21.10.24	Виконано
4	Обґрунтування та вибір схемотехнічного рішення	22.10.24 – 29.10.24	Виконано
5	Проектування електронного модуля	06.11.24 – 13.11.24	Виконано
6	Аналіз надійності приладу	14.11.24 – 21.11.24	Виконано
7	Проведення тестувань зібраного приладу	22.11.24 – 29.11.24	Виконано
8	Оформлення текстової та графічної документації	02.12.24 – 12.12.24	Виконано

Студент

(підпис)

Ярослав НОВИЦЬКИЙ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник

(підпис)

Олександр МИРОНЧУК

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Широке використання високошвидкісних електронних пристроїв, зокрема в телекомунікаціях, радіолокації та IoT, створює підвищений попит на якісну обробку високочастотних сигналів. Зростання складності та мініатюризації електронних систем супроводжується підвищеними вимогами до підсилювачів потужності, які повинні забезпечувати стабільність роботи в умовах складного електромагнітного середовища. Сучасні телекомунікаційні та радіолокаційні системи вимагають мінімізації спотворень сигналу, забезпечення стабільного коефіцієнта підсилення та енергоефективності. Таким чином, розробка субгігагерцового підсилювача потужності, здатного відповідати цим вимогам, є актуальною та перспективною задачею.

Мета роботи. Розробка високоефективного субгігагерцового підсилювача потужності з низьким коефіцієнтом спотворень, високою лінійністю та стабільними технічними характеристиками у частотному діапазоні 10 МГц – 1.1 ГГц.

Завдання дослідження. Проаналізувати сучасний ринок підсилювачів потужності, визначити основні технічні вимоги до пристрою, розробити функціональну схему з обґрунтуванням вибору компонентної бази, виконати проектування друкованої плати за стандартами HDI із забезпеченням узгодження хвильового опору, а також провести тестування пристрою для оцінки його характеристик і відповідності технічним вимогам.

Об'єкт дослідження. Високочастотні системи обробки сигналів у субгігагерцовому діапазоні частот.

Предмет дослідження. Процеси підсилення високочастотних сигналів із забезпеченням високої лінійності, мінімального рівня спотворень та стабільної роботи в телекомунікаційних і радіолокаційних системах.

Практична цінність. Розроблений субгігагерцовий підсилювач потужності забезпечує стабільну роботу, високий коефіцієнт підсилення та

енергоефективність. Це дозволяє застосовувати його у телекомунікаціях, радіолокаційних системах, супутникових технологіях і IoT-пристроях, відповідаючи сучасним вимогам до високочастотних систем.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків. Повний обсяг дисертації становить 116 сторінок, з яких 83 сторінки основного тексту. Робота містить 2 таблиць, 84 рисунків, 16 джерел літератури та 5 додатків.

Ключові слова: субгігагерцовий підсилювач, частотний діапазон, високочастотні сигнали, друкована плата, HDI-стандарт, лінійність.

ABSTRACT

Relevance of the Topic. The widespread use of high-speed electronic devices, particularly in telecommunications, radar systems, and IoT, creates an increased demand for efficient processing of high-frequency signals. The growing complexity and miniaturization of electronic systems are accompanied by heightened requirements for power amplifiers, which must ensure stable operation in complex electromagnetic environments. Modern telecommunications and radar systems require minimized signal distortions, stable gain coefficients, and high energy efficiency. Thus, the development of a sub-gigahertz power amplifier capable of meeting these demands is a relevant and promising task.

Objective of the Work. The development of a high-performance sub-gigahertz power amplifier with low distortion, high linearity, and stable technical characteristics within the frequency range of 10 MHz – 1.1 GHz.

Research Tasks. To analyze the current market for power amplifiers, determine the primary technical requirements for the device, develop a functional schematic with a substantiated selection of components, design a printed circuit board (PCB) according to HDI standards with impedance matching, and conduct testing of the device to evaluate its performance and compliance with technical requirements.

Object of Research. High-frequency signal processing systems operating in the sub-gigahertz frequency range.

Subject of Research. Processes for amplifying high-frequency signals while ensuring high linearity, minimal distortion levels, and stable operation in telecommunications and radar systems.

Practical Significance. The developed sub-gigahertz power amplifier ensures stable operation, a high gain coefficient, and energy efficiency. This makes it suitable for use in telecommunications, radar systems, satellite technologies, and IoT devices, meeting the modern requirements for high-frequency systems.

The dissertation consists of an introduction, four chapters, and conclusions. The total volume of the dissertation is 116 pages, including 83 pages of the main text. The work includes 2 tables, 84 figures, 16 references, and 5 appendices.

Keywords: sub-gigahertz amplifier, frequency range, high-frequency signals, printed circuit board, HDI standard, linearity.

ЗМІСТ

ABSTRACT	6
ЗМІСТ	8
Вступ.....	10
1 Актуальність проблеми	12
2 Аналоги на ринку	13
2.1 Dragino LG01-P — LoRa Gateway	13
2.2 Milesight UG65 — LoRaWAN Gateway.....	14
2.3 Kerlink iFemtoCell Evolution — LoRaWAN Gateway.....	16
3 Аналіз технічного завдання.....	18
3.1 Структурна схема пристрою	19
3.2 Схема електрична принципова системи управління.....	21
3.3 Схема електрична принципова створення від’ємного сигналу управління для підсилюванням	22
3.4 Схема електрична принципова перетворювача напруги для живлення підсилювача	23
3.5 Схема електрична принципова високочастотного підсилювача потужності	25
3.6 схема електрична принципова вхідних роз’ємів із захистом від неправильної подачі живлення.....	27
3.7 Вибір компонентної бази	28
4 Розробка друкованої плати	52
4.1 Обґрунтування технологічності друкованої плати	52
4.2 Вибір матеріалу друкованої плати	53
4.3 Вибір припою	54
4.4 Обґрунтування розмірів друкованої плати	54
4.5 Ширини провідників ДП.....	55
4.6 Трасування друкованої плати	58
4.7 Розрахунок надійності	62
5 Результати тестування розробленого приладу.....	65
5.1 Опис використаного обладнання та схеми підключення	65

5.2 Зняття характеристик підсилення	69
Перелік джерел	94
Додаток А.....	96
Додаток Б	100
Додаток В.....	102
Додаток Г	108
Додаток Д.....	114

ВСТУП

У сучасних умовах високий рівень розвитку технологій робить якісну обробку та передачу даних ключовими завданнями у таких галузях, як телекомунікації, радіолокація, супутниковий зв'язок та оборона. Значну роль у цих процесах відіграють субгігагерцові підсилювачі, що забезпечують підсилення високочастотних сигналів у широкому діапазоні частот від 10 МГц до 1.1 ГГц [1]. Цей діапазон дозволяє ефективно передавати інформацію, підтримувати стабільний зв'язок і здійснювати аналіз об'єктів на великих відстанях.

Високочастотні підсилювачі є невід'ємним компонентом сучасного обладнання, забезпечуючи безперебійність комунікацій, точність передачі даних та надійність критично важливих систем. У радіолокаційних системах вони дозволяють посилювати сигнали до рівня, достатнього для виявлення об'єктів, їхнього відстеження та розпізнавання. В оборонних системах підсилювачі забезпечують надійний зв'язок навіть за умов активних завад, а у супутникових системах гарантують якісну передачу даних між супутниками й наземними станціями у несприятливих умовах.

Для субгігагерцових підсилювачів важливими є параметри, що мінімізують спотворення сигналу, забезпечують стабільний коефіцієнт підсилення у широкому діапазоні частот і гарантують енергоефективність. Не менш значущими є стійкість до зовнішніх впливів, таких як температурні коливання та електромагнітні завади, а також компактність, що робить пристрої зручними для інтеграції у портативні й мобільні системи.

Зважаючи на потреби ринку, важливим завданням є створення субгігагерцових підсилювачів, які відповідають сучасним технічним і ринковим вимогам. Ринок таких пристроїв відзначається попитом на високоефективні, енергоощадні та стійкі до зовнішніх впливів підсилювачі, що працюють у широкому частотному діапазоні. Основними тенденціями є

розширення частотного діапазону, зменшення розмірів та підвищення енергоефективності.

У цій роботі розглядається створення субгігагерцового підсилювача, здатного забезпечити високу стабільність сигналу, енергоефективність і компактність. Існуючі рішення не завжди відповідають цим вимогам, зокрема у питаннях лінійності та стійкості до зовнішніх впливів, що є критичними для систем, таких як IoT, радіозв'язок та супутникові платформи.

Метою роботи є розробка субгігагерцового підсилювача, який забезпечуватиме стабільну роботу, високий коефіцієнт підсилення та ефективність у діапазоні частот від 10 МГц до 1.1 ГГц. У межах дослідження буде проведено аналіз ринку підсилювачів для визначення технічних вимог, розроблено функціональну та структурну схеми пристрою, обрано оптимальну компонентну базу, виконано проектування друкованої плати з урахуванням HDI-стандартів та узгодження хвильового опору, а також проведено тестування пристрою. У результаті планується створити високопродуктивний підсилювач, що відповідатиме сучасним стандартам і забезпечуватиме стабільну роботу в різноманітних високочастотних системах.

1 АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

Стрімкий розвиток технологій змінює підходи до побудови інфраструктури зв'язку, особливо там, де потрібен стабільний зв'язок на великі відстані. IoT, промислові бездротові мережі та системи автоматизації вимагають енергоефективних рішень, здатних працювати з високим рівнем перешкод і малим споживанням енергії. Розробка потужних підсилювачів для Sub-GHz діапазону (до 1 ГГц) є актуальною, оскільки він забезпечує стабільну передачу сигналу на великі відстані, проникаючи через фізичні бар'єри.

Впровадження IoT-систем у сільському господарстві, промисловості, медицині й побуті створює попит на Sub-GHz підсилювачі завдяки їх проникаючій здатності і великому радіусу дії, що критично для віддалених пристроїв на батарейках. Такі підсилювачі зберігають енергію і забезпечують тривалий зв'язок у реальному часі.

У промисловості підсилювачі повинні забезпечувати стабільність сигналу, низький рівень шуму і високу лінійність для надійного моніторингу й автоматизації процесів. Такі пристрої мають працювати стабільно в умовах температурних коливань і вібрацій, забезпечуючи довговічність і зниження витрат на експлуатацію.

Sub-GHz діапазон також є важливим для 5G і новітніх бездротових мереж, дозволяючи охоплювати великі території з низькими витратами енергії, що необхідно для систем "розумного міста" і віддалених сенсорних мереж.

Таким чином, підсилювачі потужності в Sub-GHz діапазоні сприятимуть розвитку IoT, підвищенню ефективності промислових мереж і впровадженню сучасних технологій зв'язку, забезпечуючи стабільний зв'язок у складних умовах і знижуючи енергоспоживання.

2 АНАЛОГИ НА РИНКУ

2.1 Dragino LG01-P — LoRa Gateway



Рисунок 2.1 - Dragino LG01-P — LoRa Gateway

Частотний діапазон: 902–928 МГц (для американського ринку) або 868 МГц (для європейського ринку)

Вихідна потужність: до 20 дБм (100 мВт)

Dragino LG01-P (рисунок 2.1) [2]— це одноканальний шлюз LoRa, розроблений для створення низьковартісної інфраструктури IoT з мінімальним споживанням енергії та стабільним сигналом. Завдяки роботі у Sub-GHz діапазоні шлюз забезпечує високу здатність проникнення сигналу через перешкоди та стабільну передачу даних на значні відстані. Це робить його оптимальним для побудови систем моніторингу і збору даних у віддалених або важкодоступних місцях, таких як ферми, великі промислові комплекси, або райони, де інфраструктура зв'язку обмежена.

Підтримка LoRaWAN: Шлюз Dragino LG01-P сумісний із LoRaWAN, що дозволяє його використовувати в стандартних IoT мережах з великим радіусом дії.

Інтерфейси підключення: Пристрій має модулі Wi-Fi та Ethernet, що забезпечує зручне підключення до мережі з будь-якого місця.

Просте налаштування: Інтерфейс шлюзу розроблений для легкого налаштування, що дозволяє швидко впровадити пристрій у роботу навіть користувачам без глибоких технічних знань.

Dragino LG01-P дозволяє створити економічну IoT-мережу для віддаленого збору даних та управління пристроями, що особливо важливо для масштабованих систем з низьким рівнем обслуговування.

2.2 Milesight UG65 — LoRaWAN Gateway



Рисунок 2.2 - Milesight UG65

Частотний діапазон: 863–870 МГц (Європа) або 902–928 МГц (Америка)

Вихідна потужність: до 27 дБм (500 мВт)

Milesight UG65 (рисунок 2.2) [3] — це високопродуктивний LoRaWAN шлюз промислового класу, створений для стабільної роботи в складних умовах зовнішнього середовища. Завдяки класу захисту IP65, пристрій ефективно функціонує навіть у вологих або запилених умовах, що робить його надійним вибором для використання на відкритих територіях. UG65 дозволяє здійснювати якісний зв'язок на великих відстанях і підтримує надійне підключення навіть у віддалених місцях. Завдяки своїй потужності і можливостям підключення до інтернету через Ethernet і 4G, UG65 підходить для широкого спектра IoT застосувань, що потребують стабільного і тривалого зв'язку.

Підтримка LoRaWAN з високою чутливістю: UG65 підтримує LoRaWAN-протокол, що дозволяє збирати дані від великої кількості пристроїв на великих відстанях (до 10 км у відкритому просторі).

Інтеграція з Ethernet та 4G: Шлюз можна підключити до мережі як через Ethernet, так і через 4G. Це забезпечує гнучкість підключення, особливо в умовах, коли відсутня стабільна дротова мережа.

Розширена зона покриття: Потужність передачі до 27 дБм та висока чутливість приймача дозволяють UG65 покривати великі території, що є важливим для моніторингу у сільському господарстві та промислових зонах.

Низьке енергоспоживання: Завдяки оптимізованому споживанню енергії UG65 може працювати тривалий час з мінімальними витратами, що робить його придатним для автономного використання.

Захист IP65: Міцний корпус, захищений від пилу і вологи, дозволяє використовувати UG65 в зовнішніх умовах, навіть при сильному дощі та пилових бурях.

Milesight UG65 — це універсальний шлюз для широкого спектра IoT задач, що потребують надійного і масштабованого підключення. Завдяки високій потужності, підтримці різних способів підключення і захищеному

корпусу, цей шлюз підходить як для індустріальних, так і для екологічних і міських застосувань.

2.3 Kerlink iFemtoCell Evolution — LoRaWAN Gateway



Рисунок 2.3 - Kerlink iFemtoCell Evolution

Частотний діапазон: 868 МГц (для Європи) або 915 МГц (для Північної Америки)

Вихідна потужність: до 27 дБм (500 мВт)

Kerlink iFemtoCell Evolution (рисунок 2.3) [4] — це компактний LoRaWAN шлюз, розроблений для використання у приміщеннях. Завдяки своїй потужності та надійності передачі сигналу, цей пристрій оптимально підходить для створення IoT-мереж всередині будівель, забезпечуючи стабільне покриття та зв'язок для широкого спектра внутрішніх застосувань. iFemtoCell забезпечує високу стабільність передачі даних навіть в умовах із щільним середовищем кінцевих пристроїв, що робить його ідеальним для комерційного використання та автоматизації виробничих приміщень.

Підтримка до 1000 кінцевих пристроїв: Завдяки можливості підтримки великої кількості підключених пристроїв iFemtoCell чудово підходить для розгортання масштабних IoT-мереж у комерційних приміщеннях і на виробництві.

Просте налаштування: Шлюз оснащений інтуїтивним інтерфейсом і забезпечує легке налаштування та впровадження, що зменшує час і зусилля на запуск мережі.

Низьке енергоспоживання: Оптимізований для економного використання енергії, iFemtoCell мінімізує споживання, що важливо для тривалого і безперервного використання у приміщеннях.

Віддалене управління: Підтримка віддаленого доступу до шлюзу дозволяє здійснювати управління та моніторинг у реальному часі, що є зручним для технічної підтримки і відстеження стану пристрою.

Kerlink iFemtoCell Evolution є надійним і високопродуктивним шлюзом для внутрішнього використання, який дозволяє створювати ефективні IoT-мережі з підтримкою віддаленого керування та низьким споживанням енергії. Це рішення ідеально підходить для розгортання "розумних" приміщень, виробничих процесів та систем моніторингу в масштабних внутрішніх просторах.

3 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Для забезпечення ефективної роботи підсилювача потужності в діапазоні частот до 1 ГГц були визначені основні технічні вимоги до пристрою. Підсилювач призначений для застосувань, де потрібна стабільна передача сигналу на великі відстані з низьким енергоспоживанням, таких як IoT-системи, промислові мережі та автономні сенсори.

Основні технічні вимоги

Робочий частотний діапазон: 10 МГц – 1,1 ГГц з оптимальною частотою 433 МГц.

Пристрій повинен забезпечувати роботу в широкому діапазоні частот для сумісності з різними стандартами зв'язку. Оптимальна частота 433 МГц дозволяє забезпечити високу проникаючу здатність сигналу, необхідну для стабільного зв'язку на великих відстанях.

Вихідна потужність: до 10 Вт (40 дБм).

Підсилювач повинен мати потужність до 10 Вт для якісної передачі сигналу на значні відстані. Така потужність необхідна для застосувань, що вимагають надійного зв'язку в умовах високих перешкод або фізичних бар'єрів.

Коефіцієнт підсилення: високий та стабільний на всьому діапазоні частот.

Пристрій має забезпечувати стабільний коефіцієнт підсилення на всіх робочих частотах для підтримання якості сигналу навіть при змінних умовах роботи, що є критичним для точності передачі даних.

Підсилювач повинен зберігати високий рівень лінійності для запобігання інтермодуляційним спотворенням, що важливо для підтримки чистоти і точності переданого сигналу в системах зв'язку.

Пристрій має характеризуватися низьким рівнем шуму, що дозволяє підтримувати високу чутливість приймача і чіткість сигналу, особливо при передачі на великі відстані в складних умовах.

Підсилювач повинен бути енергоефективним, щоб забезпечити тривалу роботу від автономних джерел живлення. Це особливо важливо для IoT-пристроїв, що функціонують на батарейках або в умовах обмеженого живлення.

Підсилювач повинен забезпечувати стабільність параметрів у широкому діапазоні температур, що дозволяє використовувати його в зовнішніх або промислових середовищах із змінною температурою.

Гармонічні та інтермодуляційні спотворення: мінімальні для чистоти сигналу.

Підсилювач має забезпечувати мінімальні рівні гармонічних і інтермодуляційних спотворень, що дозволяє підтримувати якісний і точний сигнал, важливий для безперебійної передачі даних.

Дотримання цих вимог гарантує, що підсилювач потужності відповідатиме сучасним стандартам для бездротових і промислових мереж, забезпечуючи надійність, енергоефективність та високу якість сигналу при тривалій експлуатації.

3.1 Структурна схема пристрою

На основі аналізу технічного завдання було сформовано структурну схему приладу підсилювача (рисунок 3.1).

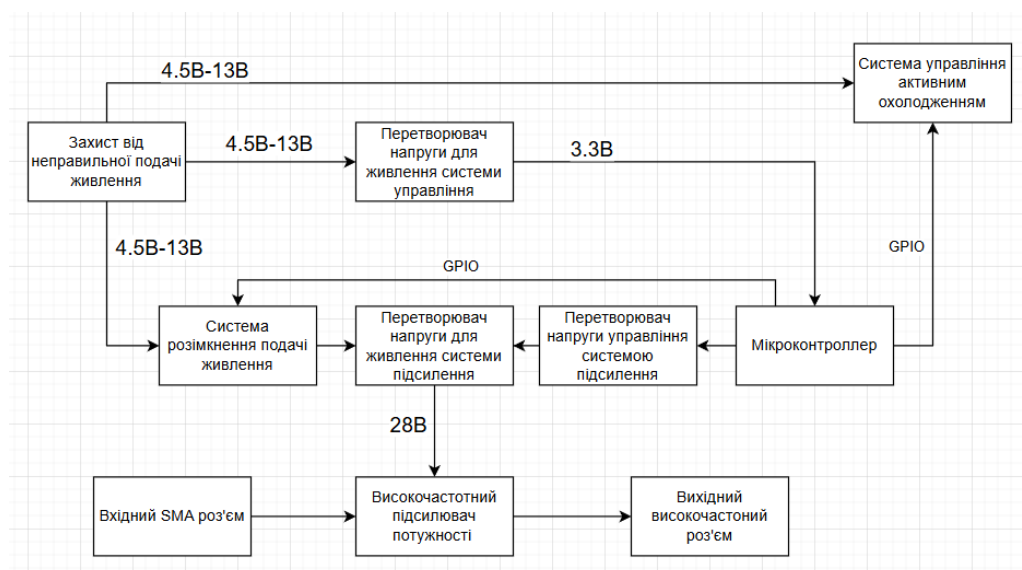


Рисунок 3.1 – структурна схема приладу

Схема складається із таких блоків:

Для живлення системи підсилювача використовується вхідний роз'єм, який підтримує напругу від 5 В до 13 В і пропускає струм у межах 0.8–2 А. Це дозволяє використовувати різні джерела живлення, зокрема стандартні адаптери або портативні джерела енергії. На платі інтегрований підвищуючий перетворювач напруги, який підвищує вхідну напругу до 28 В, що є оптимальним для роботи високочастотного підсилювача потужності. Додатково встановлений СУК-перетворювач забезпечує від'ємну напругу, необхідну для точного регулювання коефіцієнта підсилення.

Мікроконтролер виступає як центральний елемент системи управління, виконуючи кілька ключових функцій: він контролює вихідну потужність підсилювача, управляє процесами ввімкнення та вимкнення підсилювача, а також координує роботу системи активного охолодження. Завдяки інтеграції мікроконтролера в архітектуру пристрою вдалося значно спростити схему управління, підвищивши її надійність та функціональність.

Система активного охолодження включає термодатчики та керовані охолоджувачі, які регулюють інтенсивність охолодження залежно від температури компонентів. Це дозволяє уникнути перегріву і забезпечити стабільну роботу навіть при пікових навантаженнях.

Сигнал на вхід підсилювача подається через вхідний SMA-роз'єм. Високочастотний підсилювач потужності підсилює цей сигнал і передає його на вихід через вихідний SMA-роз'єм, забезпечуючи якісне та стабільне підсилення сигналу в заданому діапазоні частот. Уся система спроектована з урахуванням вимог до ефективності, стабільності та захисту компонентів, що робить її придатною для тривалого використання у різноманітних умовах.

Для зручного оновлення прошивки передбачено спеціальний роз'єм для підключення програматора, що дозволяє легко виконувати перепрошивання або модернізацію програмного забезпечення.

Додатково у схемі інтегрована система управління дводрововим кулером, що реалізована на основі транзисторного ключа. Це дозволяє автоматично регулювати роботу кулера залежно від температури компонентів, забезпечуючи ефективне охолодження всієї плати.

3.3 Схема електрична принципова створення від'ємного сигналу управління для підсилюванням

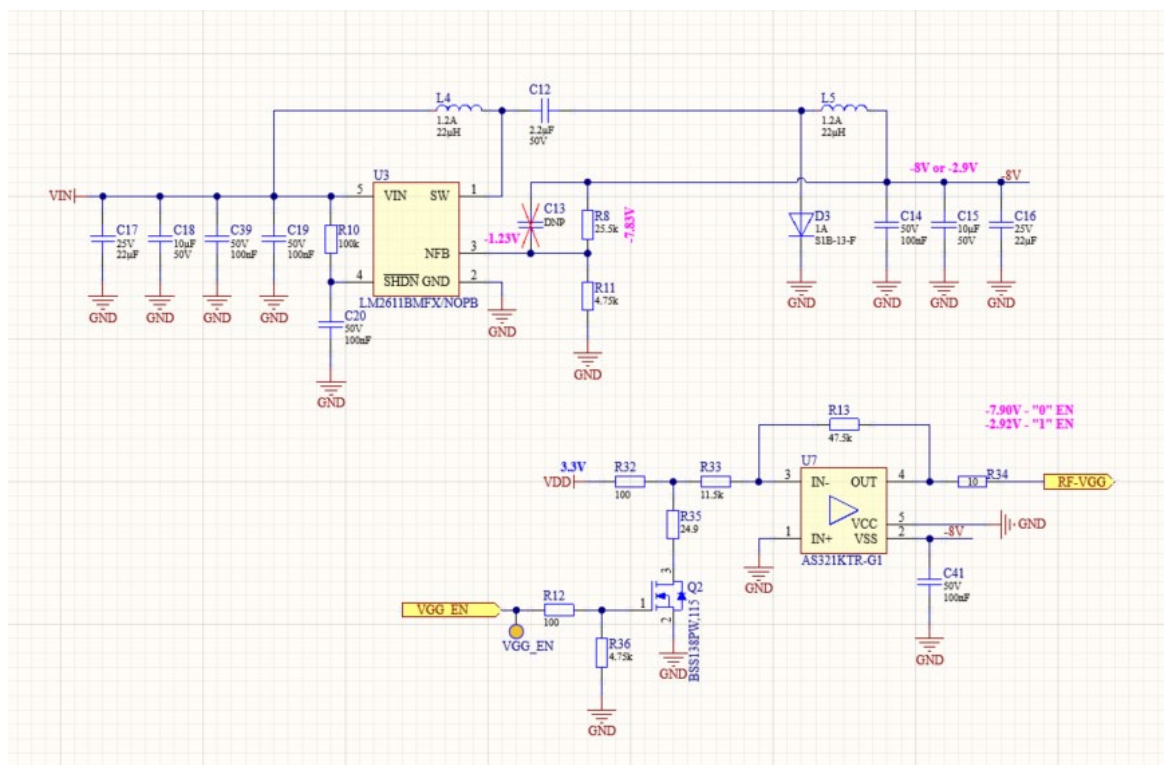


Рисунок 3.3 – схема електрична принципова створення від'ємного сигналу управління для підсилюванням

Для формування системи від'ємної напруги використовується мікросхема LM2611, яка є низьковольтним інверторним перетворювачем, розробленим для створення стабільної від'ємної напруги. Цей чип працює на частоті до 2 МГц, забезпечуючи високу ефективність навіть при компактному розмірі. Завдяки інтегрованій схемі захисту від перевантаження та низькому рівню

шуму LM2611 ідеально підходить для живлення схем із високими вимогами до стабільності та точності.

Для формування сигналу використовується операційний підсилювач AS321KTR-G1, підключений у схемі інвертуючого підсилювача. Цей енергоефективний компонент забезпечує надійне перетворення та регулювання сигналів з мінімальним споживанням енергії.

На виході системи, залежно від стану транзистора Q2, що управляється мікроконтролером, формуються дві напруги: -7.9 В або 2.92 В. Якщо транзистор активний (подається позитивна напруга), на виході присутня напруга -2.92 В. У протилежному випадку (при подачі "0" на ключ) формується від'ємна напруга -7.9 В (рисунок 3.3).

3.4 Схема електрична принципова перетворювача напруги для живлення підсилювача

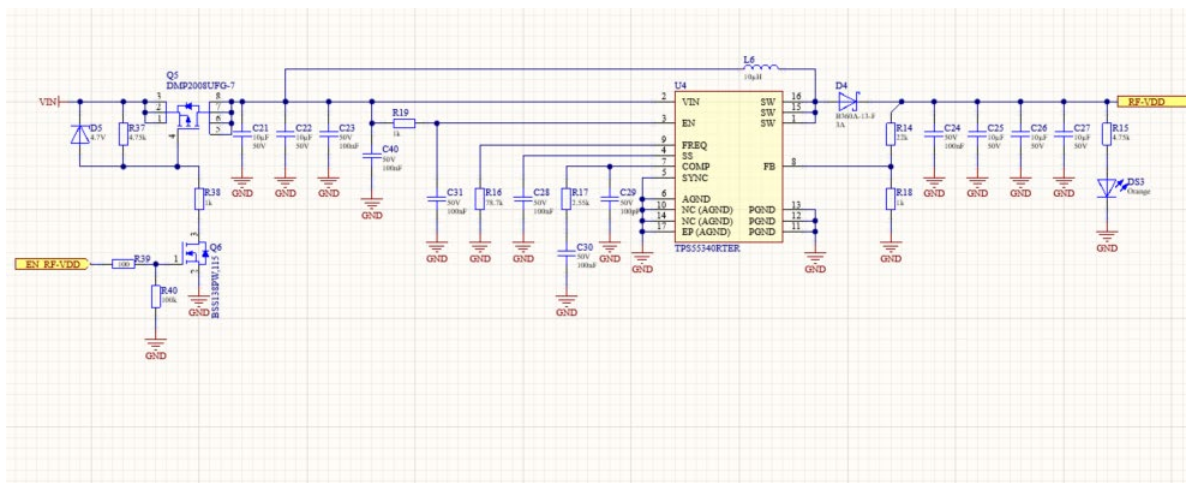


Рисунок 3.4 - Схема електрична принципова перетворювача напруги для живлення підсилювача

Для живлення підсилювача використовується підвищуючий перетворювач напруги TPS55340RTER, розроблений компанією Texas Instruments. Це високоефективний DC-DC перетворювач, який забезпечує стабільну вихідну напругу до 40 В при вхідній напрузі в діапазоні від 2.9 В до 32 В, що дозволяє використовувати його з різноманітними джерелами живлення. Завдяки високій частоті перемикання до 2.5 МГц, TPS55340

забезпечує компактність схеми, низький рівень пульсацій і високу ефективність роботи, що робить його оптимальним вибором для систем із високими вимогами до стабільності та продуктивності. Окрім цього, пристрій має вбудовані функції захисту від перевантаження, перенапруги та короткого замикання, що гарантує безпечну експлуатацію.

Однак підвищуюча топологія перетворювача має специфічну особливість, яка може стати джерелом проблем. Верхнє плече такої схеми, реалізоване через діод D4, забезпечує з'єднання між вхідною та вихідною напругою. Унаслідок цього, навіть коли перетворювач вимкнено, вхідна напруга передається на вихід через діод. Це унеможливорює повне вимкнення вихідної напруги, що може призводити до небажаного енергоспоживання, порушення енергоефективності та розрядження батарей у автономних пристроях, навіть коли підсилювач не використовується.

Для вирішення цієї проблеми у схемі використовується потужний транзистор Q5, який встановлений на вході перетворювача. Він забезпечує повне відключення джерела живлення від виходу, усуваючи витік напруги через діод у вимкненому стані. Управління транзистором реалізовано за допомогою мікроконтролера, що дозволяє точно та автоматично контролювати подачу живлення залежно від режиму роботи підсилювача (рисунок 3.4).

3.5 Схема електрична принципова високочастотного підсилювача потужності

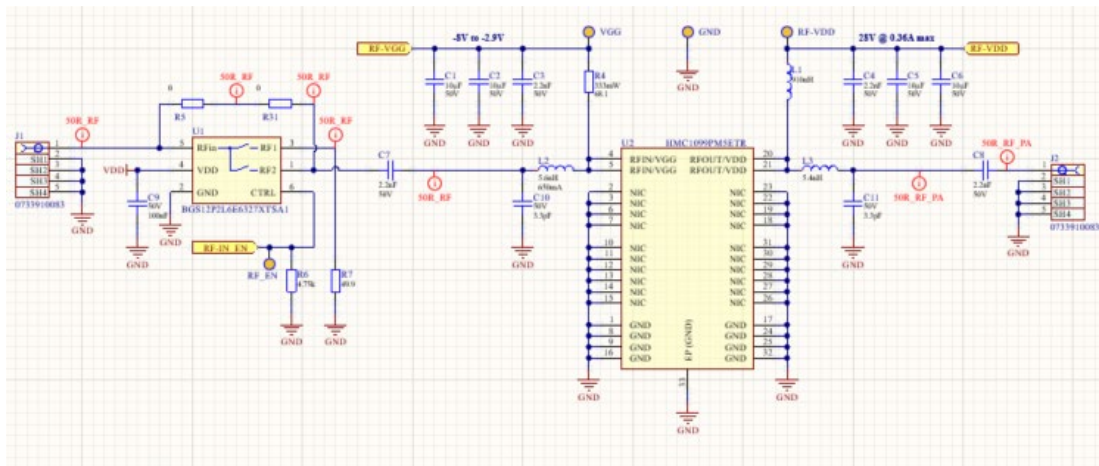


Рисунок 3.5 – схема електрична принципова високочастотного підсилювача потужності

Для забезпечення високочастотного підключення в системі використовується SMA-роз'єм J1 0733910083, розроблений компанією Molex. Цей роз'єм забезпечує надійний зв'язок із зовнішніми джерелами сигналів, зберігаючи високу якість передавання у широкому діапазоні частот. На вході також інтегровано високочастотний перемикач BGS12P2L6E6327XTSA1 від компанії Infineon Technologies. Цей елемент виконує функцію комутації сигналу: у разі відключення живлення підсилювача перемикач спрямовує вхідний сигнал на резистор із номіналом 49.9 Ом. Така схема допомагає ефективно поглинати сигнал і запобігає виникненню відбитої хвилі на вході, що могло б погіршити роботу системи або створити перешкоди в інших компонентах.

Підсилювач реалізовано на основі мікросхеми HMC1099PM5ETR, розробленої компанією Analog Devices. Це високопродуктивний широкосмуговий підсилювач потужності, який працює в діапазоні частот від 0.01 до 1.1 ГГц, забезпечуючи вихідну потужність до 10 Вт. Завдяки інноваційній схемотехніці, HMC1099PM5ETR забезпечує високу лінійність і широкий динамічний діапазон, що робить його ідеальним для використання у

високочастотних системах, таких як радіозв'язок, радіолокація або тестові прилади.

Рішення обрати мікросхему HMC1099PM5ETR було обґрунтоване її винятковими технічними характеристиками, які відповідають вимогам поставленого завдання. Мікросхема забезпечує високий коефіцієнт підсилення у широкому частотному діапазоні, дозволяючи використовувати її у різноманітних додатках. Крім того, HMC1099PM5ETR має високу вихідну потужність до 10 Вт, низький рівень спотворень сигналу та високу лінійність, що є критичним для систем із високими вимогами до точності передачі даних. Її висока енергоефективність мінімізує теплові втрати та спрощує реалізацію системи охолодження, а наявність вбудованого захисту від перевантаження та перегріву гарантує надійність у складних умовах експлуатації.

На виході системи встановлено ще один SMA-роз'єм J2 0733910083 від Molex, який забезпечує стабільне передавання підсиленого сигналу до зовнішніх пристроїв. Така конфігурація з високоякісними компонентами та ретельно спроектованою схемою дозволяє забезпечити максимальну продуктивність системи та мінімізувати втрати сигналу в процесі його обробки й передачі (рисунок 3.5).

3.6 схема електрична принципова вхідних роз'ємів із захистом від неправильної подачі живлення

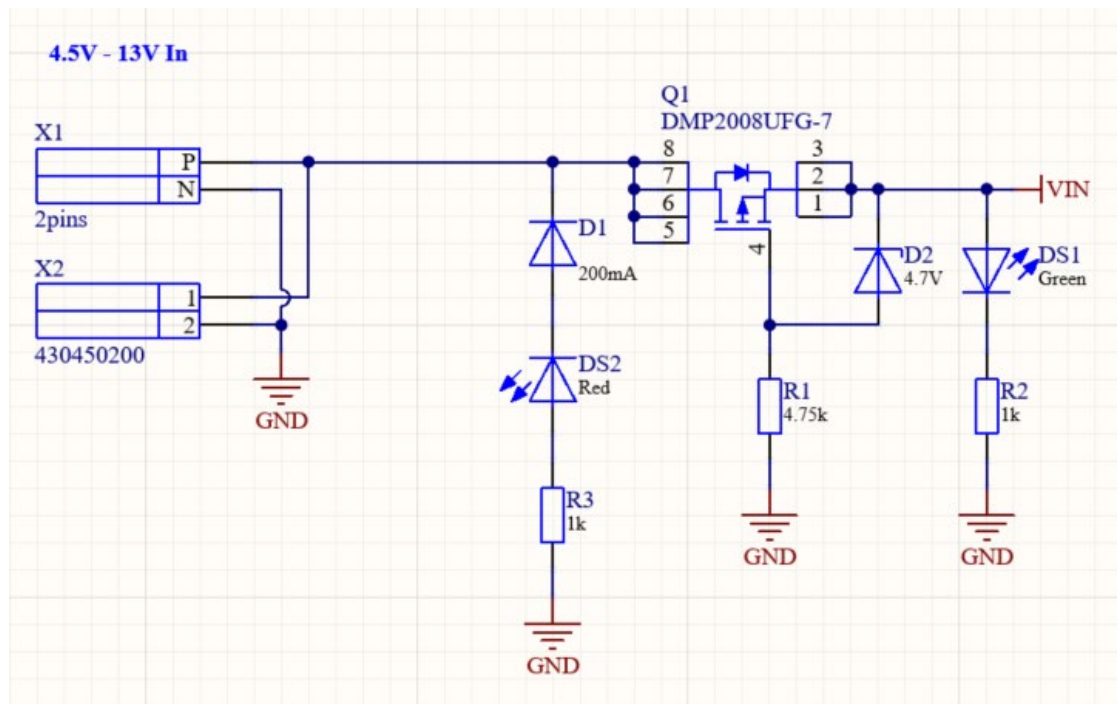


Рисунок 3.6 – схема електрична принципова вхідних роз'ємів із захистом від неправильної подачі живлення

У схемі передбачено два роз'єми для підключення джерела живлення: X1 XT30PW-M від компанії AMASS і X2 430450200 від Molex, які забезпечують надійність і гнучкість під час використання різних джерел живлення. Для захисту системи від неправильної полярності поданого живлення інтегровано схему на основі P-канального транзистора Q1 DMP2008UFG-7, розробленого компанією Diodes Incorporated. Цей транзистор автоматично блокує подачу живлення в разі неправильного підключення, забезпечуючи захист компонентів схеми (рисунок 3.6).

Додатково реалізовано світлодіодну індикацію, яка сигналізує про неправильне підключення живлення, що дозволяє користувачеві швидко ідентифікувати помилку та запобігти можливим несправностям.

3.7 Вибір компонентної бази

Оснoву вибору елементної бази становлять такі критерії, як відповідність функціоналу компонентів технічному завданню, експлуатаційні характеристики, габаритні розміри та вартість. Ці показники дозволяють забезпечити ефективність і надійність системи, зберігаючи її відповідність технічним і економічним вимогам.

Резистори

При виборі резисторів важливо враховувати їх основні параметри та місце застосування в схемі. Для даної розробки було обрано резистори поверхневого монтажу типорозміру 0402 (1005 metric) (рисунок 3.7) та 0805 (2012 metric) (рисунок 3.8) виробництва компанії Yageo, які забезпечують компактність, надійність і точність у роботі. Усі обрані резистори відповідають технічним вимогам і оптимально підходять для використання в даній схемі.

При виборі резисторів для схеми було враховано такі основні параметри:

- Опір: від 49.9 Ом до 100 кОм, що покриває потреби всіх ділянок схеми.
- Допустиме відхилення номінального опору: 1%, що забезпечує високу точність роботи.
- Габарити: 1.00 мм × 0.50 мм × 0.40 мм, відповідають стандартному типорозміру 0402 (1005 metric), що гарантує компактність і зручність монтажу та 0805 (2012 metric) 2.00 мм × 1.25 мм × 0.60 мм.
- Максимальна потужність розсіювання: до 125 мВт, достатня для роботи в даній схемі без перегріву.
- Температурний діапазон: від -55°C до +155°C, що дозволяє використовувати резистори в умовах значних перепадів температур.



Рисунок 3.7 — Резистор 0402 в середовищі Altium Designer

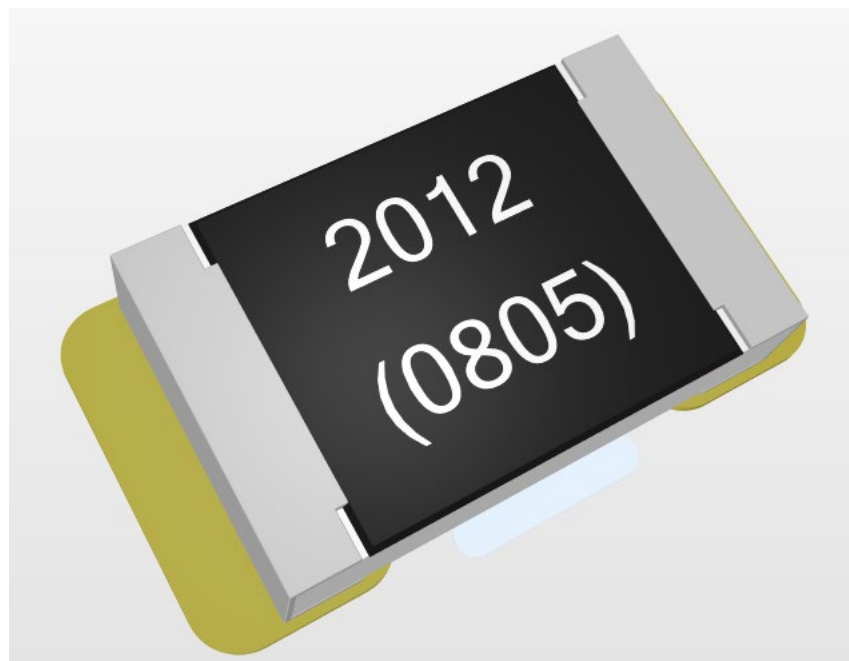


Рисунок 3.8 — Резистор 0402 в середовищі Altium Designer

| Керамічні конденсатори

При виборі конденсаторів основними критеріями були такі параметри, як ємність, типорозмір, робоча напруга та тип діелектрика, що визначає стабільність і температуру роботи компонентів. У схемі використовуються конденсатори з діелектриками класу X7R і C0G, які забезпечують низький

рівень втрат, стабільність параметрів і високу надійність. Для гарантії якості обрано компоненти від провідних виробників: Murata Electronics, Samsung Electro-Mechanics та TDK Corporation, що відповідають технічним і експлуатаційним вимогам проєкту (рисунок 3.9 та 3.10).

Для забезпечення різноманітних функцій у схемі було обрано конденсатори трьох видів корпусів із наступними характеристиками:

- Типорозмір: 0402 (1005 metric), що гарантує компактність і зручність у монтажі.
- Габарити: 1.00 мм × 0.50 мм × 0.55 мм, які відповідають стандарту для компонентів цього типу.
- Ємність: у діапазоні від 1 пФ до 1 мкФ, що дозволяє використовувати їх для різноманітних задач, від фільтрації сигналів до стабілізації напруги.
- Робоча напруга: від 16 В до 50 В, що забезпечує їхню надійну роботу в умовах різних електричних навантажень.

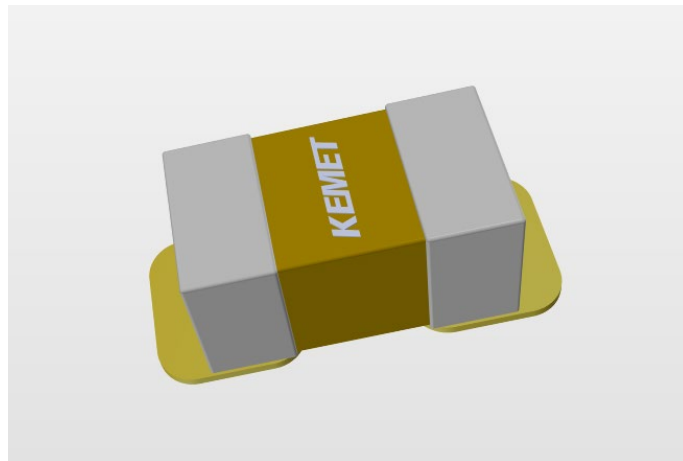


Рисунок 3.9 — Керамічний конденсатор 0402 в середовищі Altium Designer

- Типорозмір: 0805 (2012 metric), що забезпечує баланс між компактністю і можливістю розсіювання тепла.
- Габарити: 2.00 мм × 1.25 мм × 1.40 мм, оптимальні для монтажу у високощільних схемах.

- Ємність: від 10 мкФ до 47 мкФ, що дозволяє використовувати ці конденсатори для стабілізації напруги, зберігання заряду та інших функцій, де потрібна велика ємність.
- Робоча напруга: у межах 10 В – 25 В, що робить їх придатними для використання в низьковольтних схемах і живленні цифрових компонентів.



Рисунок 3.10 — Керамічний конденсатор 0805 в середовищі Altium Designer

Катушки індуктивності

Катушки індуктивності в схемі поділяються на два типи: для формування живлення та для високочастотних задач, таких як узгодження сигналів і фільтрація. При їхньому виборі враховувалися такі основні параметри, як індуктивність, робочий струм, типорозмір, активний опір, а також частотні характеристики. Особлива увага приділялася частоті саморезонансу, яка визначає ефективність дроселів у заданому діапазоні частот. Високий показник частоти саморезонансу забезпечує стабільність і мінімальні втрати

на високих частотах, що критично для задач фільтрації та узгодження в RF-схемах.

Для реалізації цих вимог були обрані індуктивності від провідних виробників, таких як Vishay Dale, Murata Electronics та TDK Corporation. Вони забезпечують високу якість компонентів, стабільні частотні характеристики та відповідність технічним вимогам проєкту (рисунки 3.11, 3.12, 3.13 та 3.14).

- Індуктивність: 5,4 нГн, оптимальна для високочастотних задач, таких як узгодження та фільтрація.
- Максимальний струм стабільної роботи: 650 мА, що забезпечує надійність і ефективність роботи навіть при значних навантаженнях.
- Типорозмір: 0402 (1005 Metric), компактний форм-фактор, що дозволяє зручно інтегрувати індуктивності у щільно компоновану плату.
- Розміри: 1.00 мм × 0.50 мм × 0.55 мм, відповідають вимогам до мініатюрних компонентів для сучасних електронних пристроїв.
- Активний опір: 140 мОм, низький рівень втрат для підвищення енергоефективності.
- Частота саморезонансу: 4,5 ГГц, що забезпечує стабільну роботу в широкому діапазоні частот, включаючи RF-застосування.

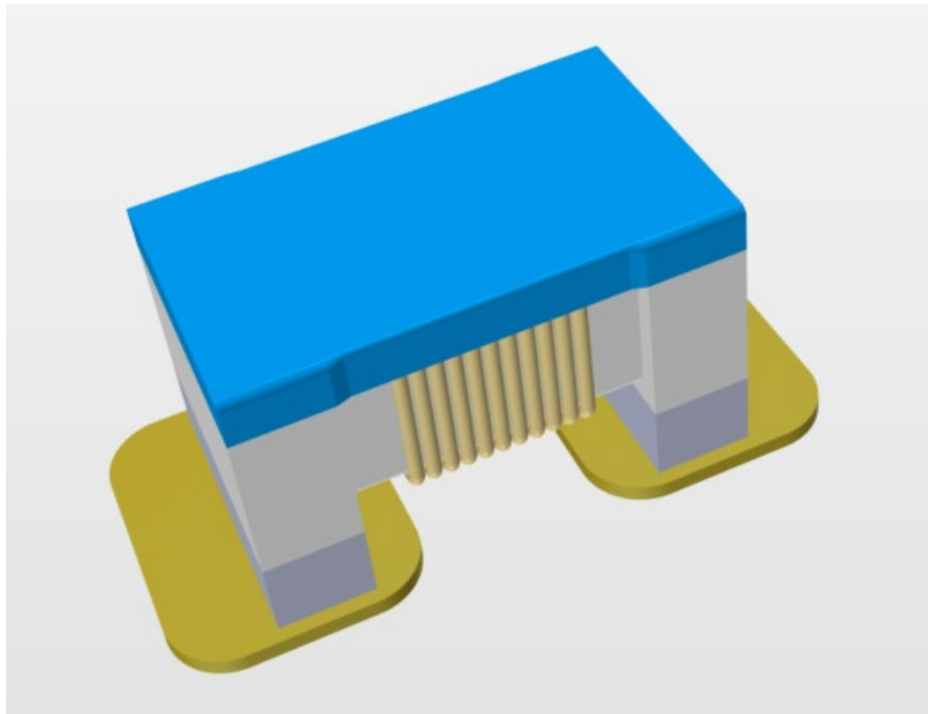


Рисунок 3.11 — Індуктор 0402 в середовищі Altium Designer

- Індуктивність: 910 нГн, оптимальна для задач височастотного узгодження та фільтрації.
- Максимальний струм стабільної роботи: 380 мА.
- Типорозмір: 1008 (2520 Metric), який поєднує компактність із здатністю працювати з більшими струмами.
- Розміри: 2.62 мм × 2.45 мм × 2.03 мм, що дозволяє інтегрувати компонент у сучасні електронні пристрої з високою щільністю монтажу.
- Активний опір: 1,1 Ом, забезпечує помірний рівень втрат для ефективного використання енергії.
- Частота саморезонансу: 1,5 ГГц.

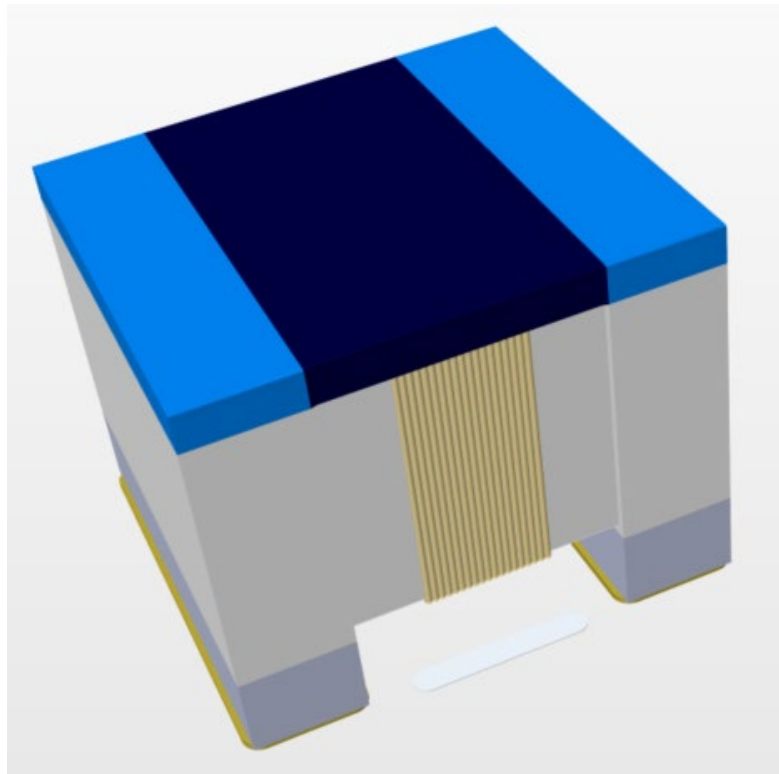


Рисунок 3.12 — Індуктор 1008 в середовищі Altium Designer

- Індуктивність: 10 мкГн, що оптимально підходить для задач стабілізації та фільтрації живлення.
- Максимальний струм стабільної роботи: 3 А, дозволяє компоненту працювати при високих навантаженнях без втрати стабільності.
- Типорозмір: 6864.
- Розміри: 6.87 мм × 6.47 мм × 3 мм, що дозволяє легко інтегрувати компонент у пристрої з обмеженим простором.
- Активний опір: 0.103 Ом, низький опір мінімізує енергетичні втрати, підвищуючи загальну ефективність системи.
- Частота саморезонансу: 16 МГц, що гарантує стабільність характеристик у низько- та середньочастотному діапазоні роботи.

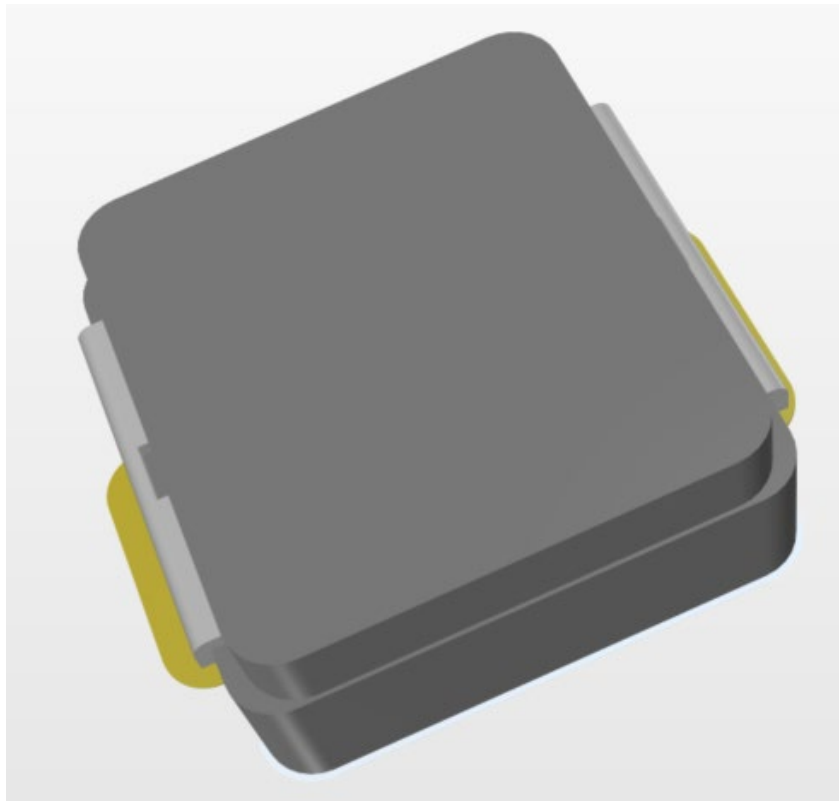


Рисунок 3.13 — Індуктор 6864 в середовищі Altium Designer

- Індуктивність: 22 мкГн, що оптимально підходить для задач стабілізації та фільтрації живлення.
- Максимальний струм стабільної роботи: 1.2 А, дозволяє компоненту працювати при високих навантаженнях без втрати стабільності.
- Типорозмір: 2-SMD.
- Розміри: 4.45 мм × 4.05 мм × 3 мм, що дозволяє легко інтегрувати компонент у пристрої з обмеженим простором.
- Активний опір: 0.5 Ом, низький опір мінімізує енергетичні втрати, підвищуючи загальну ефективність системи.
- Частота саморезонансу: 12 МГц, що гарантує стабільність характеристик у низько- та середньочастотному діапазоні роботи.

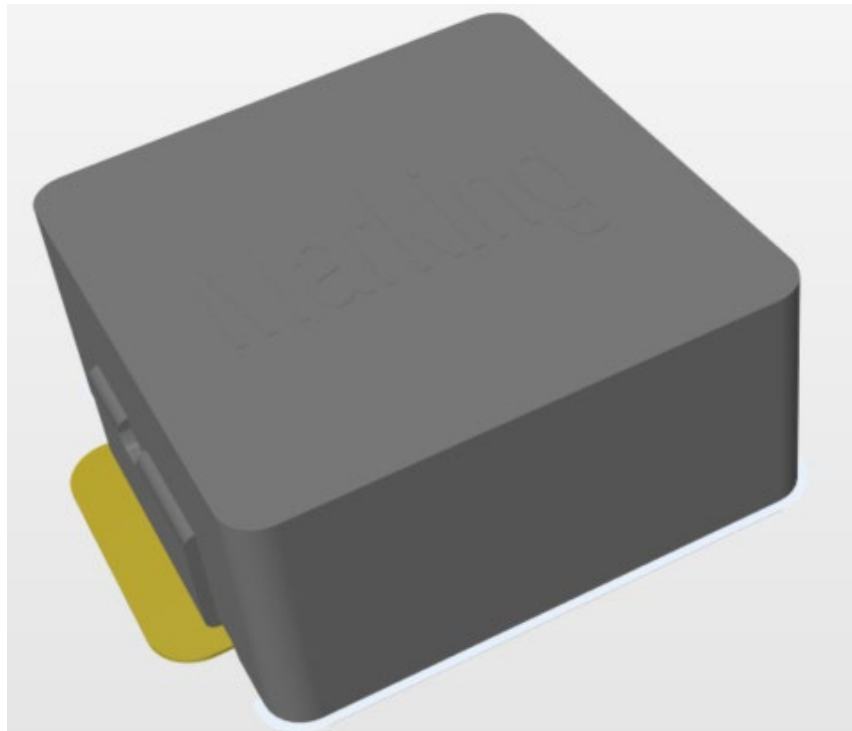


Рисунок 3.14 — Індуктор 2-SMD в середовищі Altium Designer

Операційний підсилювач

Операційний підсилювачі в схемі використовуються для управління підсиленням високочастотних сигналів. Основними критеріями вибору цього компоненту були низьке енергоспоживання, широкий діапазон робочих напруг і висока точність роботи. Завдяки низькому вхідному зсуву напруги забезпечується стабільність і точність обробки навіть слабких сигналів, що важливо для задач із високими вимогами до якості (рисунок 3.15).

Смуга пропускання підсилювача відповідає вимогам проекту, дозволяючи працювати з низько- та середньочастотними сигналами. Компактні типорозміри корпусів забезпечують легку інтеграцію в багатоконпонентні схеми, а широкий температурний діапазон роботи гарантує стабільну роботу навіть у складних умовах експлуатації.

- Тип: Операційний підсилювач з одиничним підключенням.
- Кількість каналів: 1.
- Напруга живлення: 1.8 В – 5.5 В.
- Смуга пропускання: 1 МГц.

- Вхідний зсув напруги: 2 мВ.
- Вихідний струм: 10 мА.
- Типорозмір корпусу: SOT-23-5.

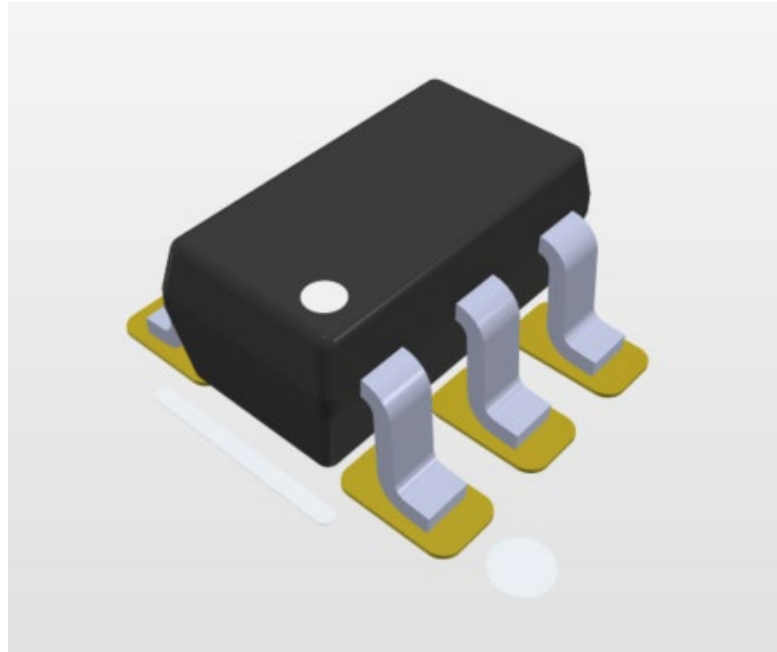


Рисунок 3.15 – Операційний підсилювач AS321KTR-G1 в середовищі Altium Designer

Силкові транзистори

Силкові транзистори DMP2008UFG-7 використовуються в схемі для забезпечення ефективного управління живленням і захисту компонентів. Це Р-канальні MOSFET-транзистори, розроблені компанією Diodes Incorporated, які відрізняються низьким опором у відкритому стані та високою струмовою пропускнуою здатністю (рисунок 3.16).

Основні характеристики DMP2008UFG-7:

- Тип транзистора: Р-канальний MOSFET.
- Максимальна напруга стік-витік (V_{ds}): -20 В.
- Максимальний струм стоку (I_d): до -5.6 А.
- Опір у відкритому стані ($R_{ds(on)}$): 47 мОм при $V_{gs} = -4.5$ В, що забезпечує низькі втрати потужності.
- Корпус: DFN2020.

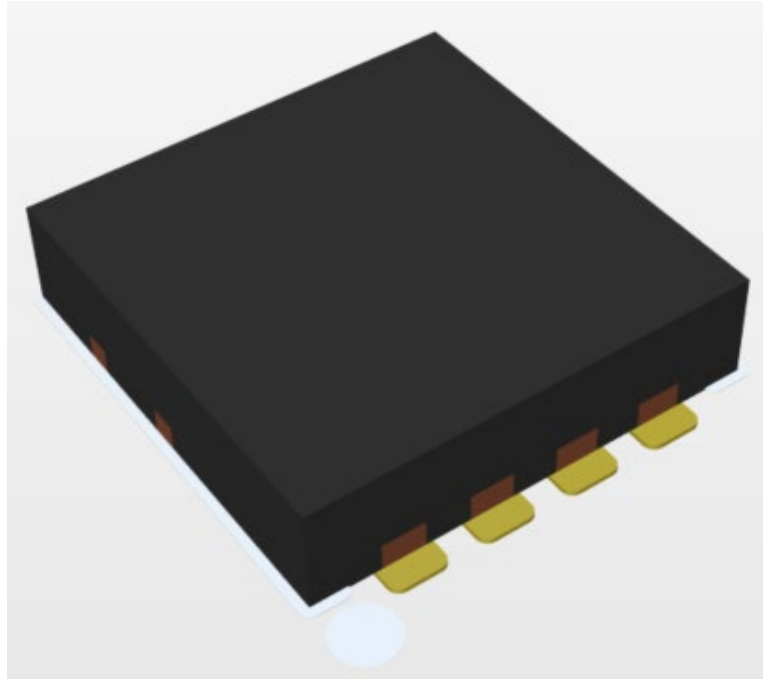


Рисунок 3.16 – силовий транзистор DMP2008UFG-7 в середовищі Altium Designer

Сигнальні транзистори

Транзистори BSS138PW,115 використовуються в схемах для комутації сигналів та управління низьковольтними ланцюгами. Це малопотужні N-канальні MOSFET-транзистори, розроблені компанією Nexperia, які забезпечують високу продуктивність за низького енергоспоживання та компактних розмірів (рисунок 3.17).

Основні характеристики BSS138PW,115:

- Тип транзистора: N-канальний MOSFET.
- Максимальна напруга стік-витік (V_{ds}): 60 В.
- Максимальний струм стоку (I_d): до 140 мА.
- Опір у відкритому стані ($R_{ds(on)}$): 1.4 Ом при $V_{gs} = 1$ В, що робить їх придатними для низьковольтних схем.

- Корпус: SOT-363.

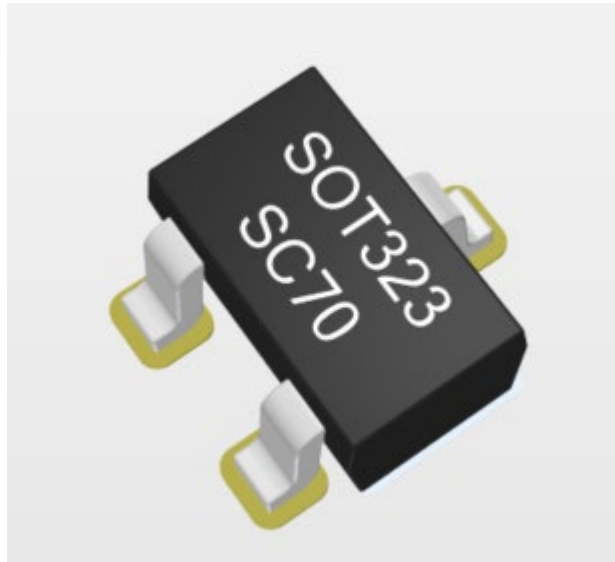


Рисунок 3.17 – сигнальний транзистор BSS138PW,115 в середовищі Altium Designer

Стабілітрони

Стабілітрони в схемі використовуються для забезпечення стабільної напруги на затворах силових MOSFET-транзисторів. Вони виконують функцію обмеження напруги, запобігаючи її перевищенню допустимих меж, що гарантує стабільну роботу транзисторів і захищає їх від пошкоджень. Завдяки стабілітронам забезпечується надійність і точність керування силовими елементами схеми, особливо в умовах змінного навантаження або зовнішніх збурень (рисунок 3.18).

Основні характеристики MM5Z4V7ST5G:

- Номінальна напруга стабілізації (V_z): 4.7 В.
- Допустиме відхилення напруги: $\pm 5\%$, що гарантує високу точність роботи.

- Максимальна потужність розсіювання (Pd): 500 мВт, забезпечує стабільність навіть у схемах із помірними тепловими навантаженнями.
- Робочий струм стабілізації (Iz): 5 мА.
- Тип корпусу: SOD-523, компактний форм-фактор, який підходить для пристроїв із високою щільністю монтажу.



Рисунок 3.18 – стабілітрон MM5Z4V7ST5G в середовищі Altium Designer

Діод Шотткі

Основними критеріями вибору діода для схеми були його ключові параметри: мале падіння напруги, що забезпечує високу енергоефективність, максимальний струм, який гарантує стабільну роботу під навантаженням, та компактні розміри, які дозволяють інтегрувати компонент у схеми з високою щільністю монтажу (рисунок 3.19).

Основні характеристики V360A-13-F:

- Тип діода: Шотткі.
- Максимальна зворотна напруга: 60 В.
- Максимальний прямий струм: 3 А.

- Падіння напруги в прямому напрямку: 0.50 В при струмі 3 А, що мінімізує втрати енергії.
- Максимальний імпульсний струм: 80 А, що забезпечує стійкість до короткочасних перевантажень.
- Корпус: SMA (DO-214AC).

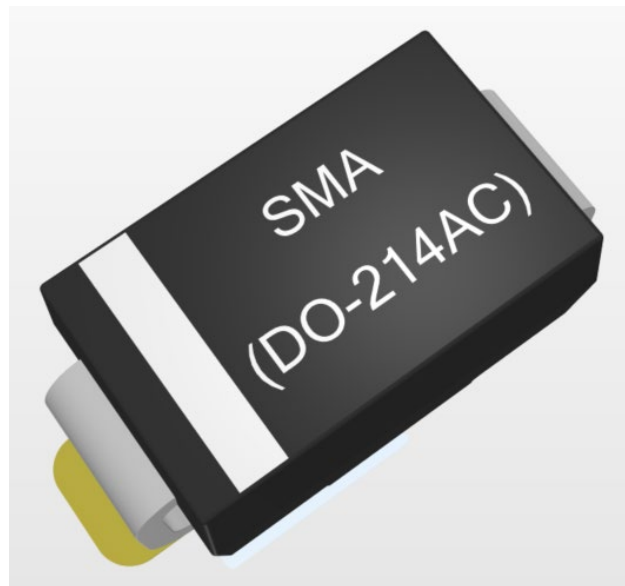


Рисунок 3.19 – Діод Шоттки MM5Z4V7ST5G в середовищі Altium Designer

|Стандартні діоди

Діоди S1B-13-F використовуються в схемах для випрямлення змінного струму та забезпечення захисту від зворотної напруги. Це малопотужні випрямні діоди, розроблені компанією Diodes Incorporated, які відзначаються високою надійністю, низьким зворотним струмом і компактним розміром, що робить їх ідеальними для використання у сучасних електронних пристроях (рисунок 3.20).

Основні характеристики S1B-13-F:

- Тип діода: Випрямний.

- Максимальна зворотна напруга: 100 В.
- Максимальний прямий струм: 1 А.
- Падіння напруги в прямому напрямку: 1.1 В при струмі 1 А, що забезпечує енергоефективність у схемах випрямлення.
- Максимальний імпульсний струм: 30 А, що гарантує стійкість до короткочасних перевантажень.
- Корпус: SMA (DO-214AC).

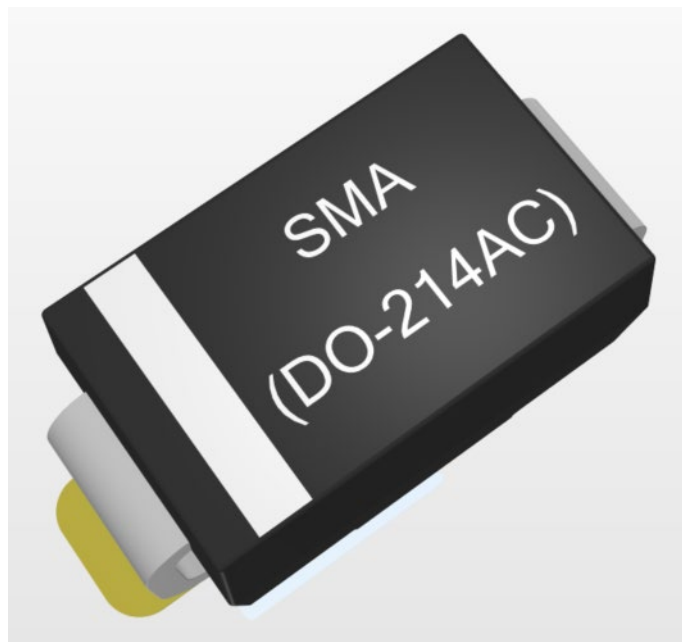


Рисунок 3.20 – Діод S1B-13-F в середовищі Altium Designer

Інвертуючий DC-DC CUK перетворювач напруги

LM2611BMFX [5] — це високочастотний інверторний DC-DC перетворювач, розроблений компанією Texas Instruments. Він призначений для створення від'ємної напруги зі стабільною продуктивністю в компактних пристроях. Завдяки своїм характеристикам, LM2611BMFX/NOPB ідеально

підходить для живлення аналогових схем, операційних підсилювачів, сенсорів та інших компонентів, що потребують від'ємної напруги (рисунок 3.21).

Основні характеристики LM2611BMFX/NOPB:

- Тип: Інверторний DC-DC перетворювач.
- Вхідна напруга (V_{in}): від 2.7 В до 14 В.
- Вихідна напруга (V_{out}): регульована, від'ємна, залежить від схеми зовнішніх компонентів.
- Максимальний струм навантаження (I_{out}): до 200 мА.
- Ефективність: до 90%, залежно від умов роботи.
- Частота перемикання (F_s): 1.2 МГц, що дозволяє використовувати компактні зовнішні компоненти.
- Захист: від перевантаження по струму та перегріву.
- Корпус: SOT-23-6

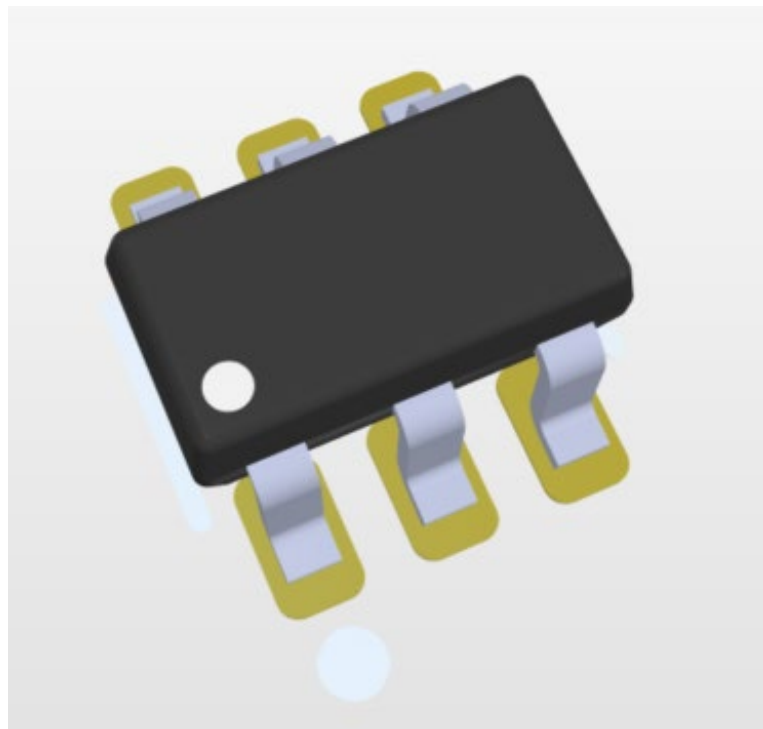


Рисунок 3.21 – LM2611BMFX CUK перетворювач напруги в середовищі
Altium Designer

Підвищуючий DC-DC перетворювач напруги

TPS55340RTER — це високоефективний підвищуючий DC-DC перетворювач, розроблений компанією Texas Instruments, призначений для забезпечення стабільної напруги в широкому діапазоні додатків. Завдяки своїм характеристикам TPS55340RTER ідеально підходить для живлення систем із високою напругою, таких як підсилювачі (рисунок 3.22).

Основні характеристики TPS55340RTER:

- Тип: Підвищуючий DC-DC перетворювач.
- Вхідна напруга: від 2.9 В до 32 В.
- Вихідна напруга: до 40 В, регульована за допомогою зовнішніх компонентів.
- Максимальний вихідний струм: залежить від параметрів зовнішніх компонентів, зазвичай до 2 А.
- Частота перемикання: регульована від 200 кГц до 2.5 МГц, що дозволяє використовувати компактні компоненти для фільтрації.
- ККД: до 96%, що забезпечує мінімальні енергетичні втрати.
- Захисти: від короткого замикання, перевантаження та перегріву.
- Корпус: VQFN-16 (3 мм × 3 мм)

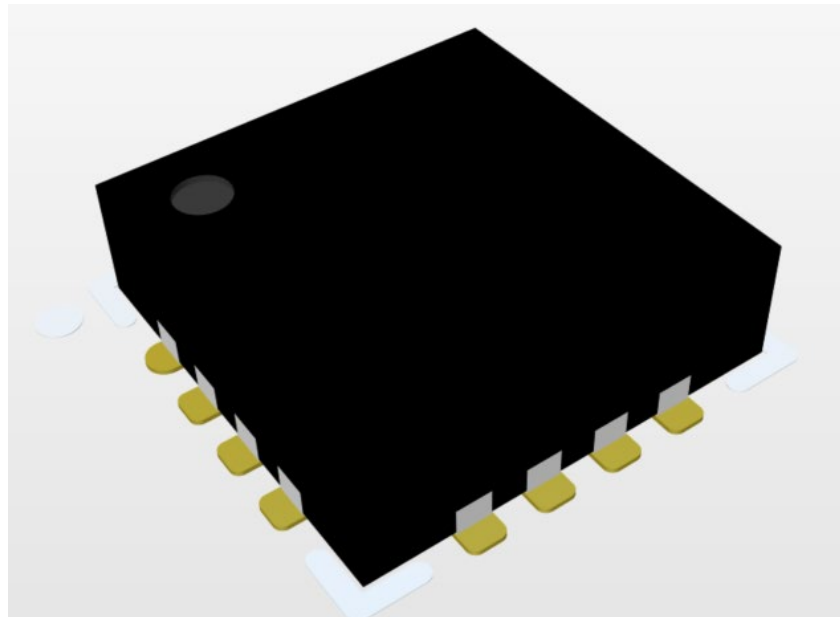


Рисунок 3.22 – TPS55340RTER перетворювач напруги в середовищі Altium Designer

Мікроконтролер STM32F030F4P6

STM32F030F4P6 — це мікроконтролер початкового рівня, розроблений компанією STMicroelectronics, який належить до серії STM32F0. Він поєднує продуктивність 32-бітного ядра ARM Cortex-M0 із низьким енергоспоживанням та широкими можливостями інтеграції, що робить його ідеальним вибором для вбудованих систем (рисунок 3.23).

Основні характеристики STM32F030F4P6:

- Ядро: ARM Cortex-M0, 32-бітне, з тактовою частотою до 48 МГц.
- Флеш-пам'ять: 16 КБ для зберігання програм.
- Оперативна пам'ять (SRAM): 4 КБ.
- Вхідна напруга живлення (Vdd): 2.4 В – 3.6 В.
- Цифрові та аналогові периферійні пристрої:
 - АЦП: 12-бітний, із можливістю роботи до 16 каналів.
 - ШІМ (PWM): для генерації точних імпульсів керування.
 - UART, SPI, I²C: серійні інтерфейси для обміну даними.
- Кількість GPIO: до 26, конфігурованих для роботи з широким спектром периферійних пристроїв.

- Система тактування: внутрішній RC-генератор на 8 МГц із підтримкою зовнішнього кварцового резонатора.

Цей мікроконтролер підходить для використання в автоматизованих системах, інтерфейсних пристроях, портативній електроніці та інших застосуваннях, де важлива компактність, низька вартість і базова продуктивність.



Рисунок 3.23 – Мікроконтролер STM32F030F4P6 в середовищі Altium Designer

Підсилювач потужності HMC1099PM5ETR

HMC1099PM5ETR — це високопродуктивний широкопasmовий підсилювач потужності, розроблений компанією Analog Devices, який забезпечує високу лінійність і ефективність роботи в широкому частотному діапазоні. Цей підсилювач є ідеальним вибором для застосувань у радіозв'язку, радіолокації та інших високочастотних системах (рисунок 3.24).

Основні характеристики HMC1099PM5ETR:

- Частотний діапазон: від 10 МГц до 1 ГГц, що забезпечує універсальність використання в різних системах.
- Вихідна потужність: до 10 Вт (40 дБм) при частоті 500 МГц.
- Коефіцієнт підсилення: 17 дБ при номінальних умовах роботи.

- Ефективність: до 67% при повній вихідній потужності, що забезпечує мінімальні енергетичні втрати.
- Живлення: робоча напруга 28 В із струмом споживання 750 мА.
- Інтегровані функції: автоматичне обмеження струму та захист від перегріву для забезпечення надійності.
- Корпус: компактний QFN-32 (5 × 5 мм), зручний для монтажу в пристроях із високою щільністю компонентів.
- Робочий температурний діапазон: від -40°C до +85°C.

Підсилювач HMC1099PM5ETR підходить для використання в передавачах сигналів, тестових і вимірювальних системах, де потрібна висока потужність і стабільність у широкому частотному діапазоні. Його висока ефективність і компактний дизайн роблять його відмінним вибором для інтеграції у високочастотні системи.

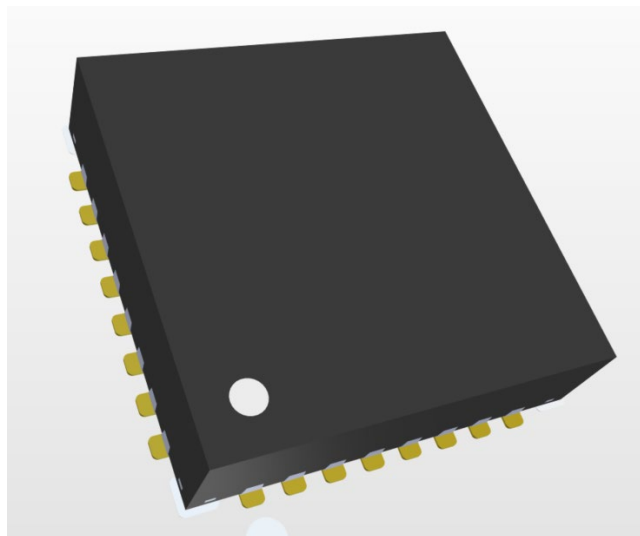


Рисунок 3.24 – Підсилювач потужності HMC1099PM5ETR в середовищі Altium Designer

Високочастотний перемикач BGS12P2L6E6327XTSA1

BGS12P2L6E6327XTSA1 — це високочастотний SPDT-перемикач від Infineon Technologies, призначений для комутації RF-сигналів у системах мобільного зв'язку та бездротових пристроях (рисунок 3.25).

Основні характеристики:

- Частотний діапазон: 0–6 ГГц.
- Втрати вставки: 0.35 дБ (2 ГГц).
- Ізоляція: 30 дБ (2 ГГц).
- Керуюча напруга: 1.65 В – 3.6 В.
- Максимальна потужність сигналу: до 36 дБм (4 Вт).
- Корпус: TSLP-6-4 (1.1 × 0.7 мм).
- Температурний діапазон: від -40°C до +85°C.

Цей компонент забезпечує ефективну комутацію RF-сигналів із низькими втратами та високою ізоляцією, оптимальний для антенних комутаторів і пристроїв IoT.



Рисунок 3.25 – Високочастотний перемикач BGS12P2L6E6327XTSA1 в середовищі Altium Designer

Роз'єм для підключення системи активного охолодження

734829-2 — це прямокутний роз'єм, розроблений компанією TE Connectivity, призначений для підключення периферійних пристроїв і забезпечення надійного електричного з'єднання в компактних пристроях. (рисунок 3.26)

Основні характеристики:

- Тип: Header (конектор для монтажу).
- Монтаж: для друкованої плати, з кріпленням під кутом.

- Кількість позицій: 2.
- Крок контактів: 0.049" (1.25 мм).
- Тип підключення: Through Hole (монтаж через отвори).
- Матеріал контактів: позолочені контакти для забезпечення низького опору і захисту від корозії.

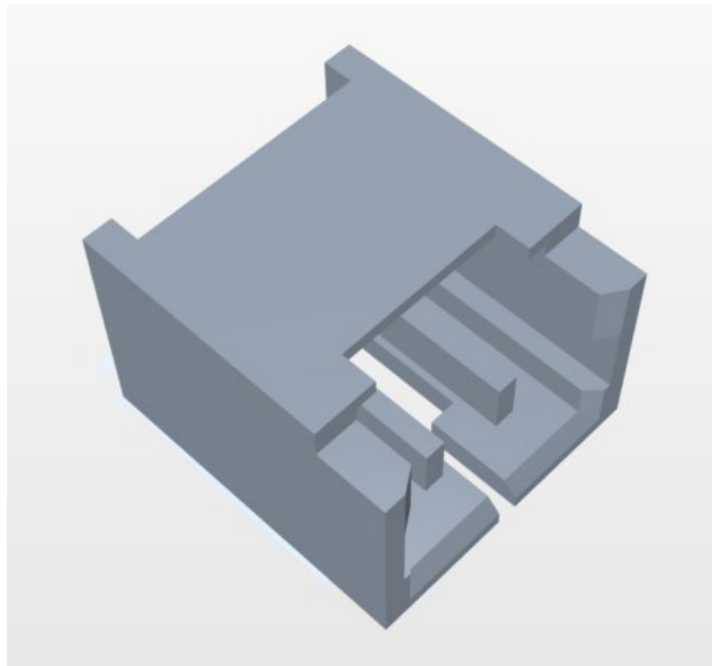


Рисунок 3.26 – Роз’єм для підключення системи активного охолодження в середовищі Altium Designer

Роз’єм для підключення живлення

430450200 — це 2-контактний роз’єм живлення, розроблений компанією Molex, який забезпечує надійне з’єднання для передачі електричної енергії в компактних пристроях (рисунок 3.27).

Основні характеристики:

Тип: Роз’єм живлення (Wire-to-Board).

Кількість позицій: 2.

Тип монтажу: для друкованої плати (Through Hole).

Крок контактів: 2.00 мм, що забезпечує компактність і надійність.

Номинальний струм: до 3 А.

Матеріал контактів: фосфорна бронза з нікельованим і олов'яним покриттям для низького опору та захисту від корозії.

Корпус: із термопластику, стійкого до високих температур.

Температурний діапазон: від -40°C до $+105^{\circ}\text{C}$.

Цей роз'єм ідеально підходить для використання в портативних пристроях, побутовій техніці та інших системах, де важлива компактність, довговічність і надійність електричних з'єднань.



Рисунок 3.27 – Роз'єм для підключення живлення в середовищі Altium Designer

Високочастотні роз'єми

0733910083 — це високочастотний SMA-роз'єм, розроблений компанією Molex, який використовується для передачі RF-сигналів із мінімальними втратами в системах зв'язку, телекомунікацій та інших високочастотних додатках (рисунок 3.28).

Основні характеристики:

- Тип: SMA-роз'єм.
- Монтаж: для друкованої плати, вертикальний монтаж.

- Частотний діапазон: до 18 ГГц, що забезпечує стабільну роботу в широкому діапазоні частот.
- Імпеданс: 50 Ом, оптимальний для RF-додатків.
- Матеріал корпусу: латунь із золотим покриттям для захисту від корозії та забезпечення низьких втрат сигналу.
- Матеріал ізоляції: PTFE, забезпечує низькі втрати та стабільність у високочастотному діапазоні.

Цей роз'єм забезпечує високу надійність і мінімальні втрати сигналу, що робить його ідеальним вибором для використання в радіозв'язку, антенних системах та інших високочастотних пристроях.

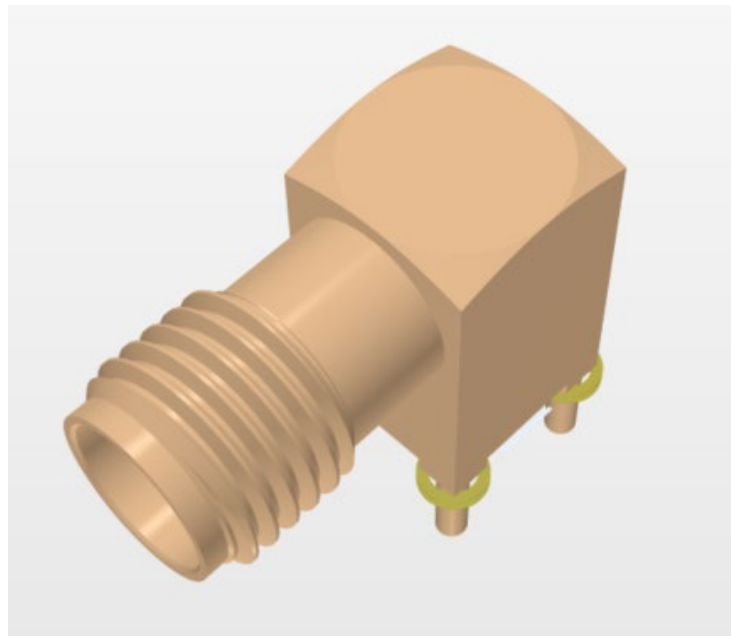


Рисунок 3.28 – Високочастотний роз'єм в середовищі Altium Designer

4 РОЗРОБКА ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ

4.1 Обґрунтування технологічності друкованої плати

Схема електрична принципова реалізована з використанням як компонентів поверхневого монтажу, так і компонентів для монтажу через отвори. На платі присутні високошвидкісні лінії передачі даних із діапазоном частот від 100 МГц до 1 ГГц. Для забезпечення узгодження хвильового опору мікросмужкових і копланарних ліній було обрано чотирьохшарову друковану плату.

Додатково плата містить силову частину, яка забезпечує живлення високопродуктивних компонентів. Силова частина розроблена з урахуванням підвищених вимог до стабільності, розсіювання тепла та захисту від перевантажень. Це включає якісну розводку силових ліній, використання конденсаторів для згладжування напруги та наявність захисних елементів.

Таке рішення зумовлене високою щільністю монтажу, яка вимагає більш складної конструкції плати, а також необхідністю забезпечення узгодження хвильового опору. Для цього опорний заземлювальний шар розташовується максимально близько до високошвидкісних ліній. Чотирьохшарова плата дозволяє ефективно вирішити ці завдання, забезпечуючи стабільну роботу як силової, так і високошвидкісної частин пристрою.

Усі компоненти поверхневого монтажу розташовані на верхній стороні плати, що зменшує вартість її виготовлення. При проектуванні плати враховані вимоги HDI-стандарту, який дозволяє досягти вищої щільності розміщення компонентів і їх взаємозв'язків. Це забезпечує компактність конструкції та підвищує ефективність електронної системи. Використання чотирьохшарової HDI-плати забезпечує оптимальну щільність монтажу, узгодження хвильового опору та стабільну роботу силової частини.

4.2 Вибір матеріалу друкованої плати

У процесі виготовлення плати було використано діелектрик TU-872, який спеціально розроблений для задоволення вимог високочастотних додатків. Це забезпечує мінімальні втрати сигналу та стабільність характеристик у широкому частотному діапазоні.

Фінішне покриття мідного шару плати виконано методом імерсійного золота (INEG), що гарантує надійний електричний контакт, покращує провідність та захищає від корозії. Завдяки такому покриттю забезпечується висока якість паяння та довговічність плати.

На завершальному етапі виготовлення плати нанесено захисний шар маски, який захищає провідники від корозії, механічних пошкоджень і зовнішнього впливу. Для зручності монтажу та ідентифікації компонентів додано білу шовкографію, що містить текстову та графічну інформацію.

Враховуючи всі ці аспекти, плата відповідає вимогам HDI-стандарту (рисунок 4.1), забезпечуючи високу продуктивність, надійність і стабільність роботи на високих частотах.









Layer Stack Legend						
	Material	Layer	Thickness	Dielectric Material	Type	Gerber
		Top Overlay			Legend	GTO
	Surface Material	Top Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask	GTS
	Nickel, Gold	Top Surface Finish	0.00mm		Surface Finish	
	CF-004	Top Layer	0.04mm		Signal	GTL
	Prepreg		0.11mm	TU-872	Dielectric	
	CF-004	Layer 1	0.04mm		Signal	G1
	Core		1.20mm	TU-872	Dielectric	
	CF-004	Layer 2	0.04mm		Signal	G2
	Prepreg		0.11mm	TU-872	Dielectric	
	CF-004	Bottom Layer	0.04mm		Signal	GBL
	Nickel, Gold	Bottom Surface Finish	0.00mm		Surface Finish	
	Surface Material	Bottom Solder	0.01mm	Solder Resist	Solder Mask	GBS
		Bottom Overlay			Legend	GBO
Total thickness: 1.59mm						

Рисунок 4.1 – Опис шарів друкованої плати

4.3 Вибір припою

Безсвинцева паяльна паста SPu-97/3 від PCBWay є оптимальним вибором для паяння SMD-компонентів завдяки своїм високим технічним характеристикам. Вона має легкоплавку формулу, що забезпечує зручність у роботі, високу розчинність і створює міцні та надійні з'єднання.

Відсутність свинцю робить цю пасту безпечною для використання, відповідаючи екологічним стандартам, що дозволяє її застосовувати у будь-якому робочому середовищі без шкоди для здоров'я та довкілля.

4.4 Обґрунтування розмірів друкованої плати

Для визначення мінімальної площі друкованої плати (ДП) необхідно підсумувати площу, яку займають усі компоненти монтажу, включно з зонами їх встановлення та необхідними відступами для забезпечення електричної ізоляції та технологічних вимог.

Мінімальну площу плати можна розрахувати за формулою:

$$S_{ДП} = 1 \cdot \sum S_{МГ} + 1.5 \cdot \sum S_{СГ} + 3 \cdot \sum S_{ВГ} \quad (4.1)$$

Де, $S_{ДП}$ — площа друкованої плати; $S_{МГ}$ — площа малогабаритних компонентів; $S_{СГ}$ — площа середньогабаритних компонентів; $S_{ВГ}$ — площа великогабаритних компонентів.

Розрахуємо площу друкованої плати:

$$S_{ДП} = 1 \cdot 90 \cdot 1.216 \text{мм}^2 + 1.5 \cdot 23 \cdot 8.289 \text{мм}^2 + 3 \cdot 10 \cdot 64 \text{мм}^2 = 2315 \text{мм}^2$$

З отриманого розрахунку отримано, що мінімальна площа друкованої плати повинна бути 2315мм^2 . Отже, оптимальні розміри ДП $50 \text{мм} \times 50 \text{мм}$, а площа дорівнює 2500мм^2 . Із такими розмірами буде легше працювати із високошвидкісними лініями, а також додавати модифікації, не змінюючи корпус пристрою.

З розрахунків встановлено, що мінімальна площа друкованої плати повинна становити 2315мм^2 . Отже, оптимальні розміри друкованої плати складають $50 \text{мм} \times 50 \text{мм}$, що дає площу 2500мм^2 .

Такі розміри забезпечують достатній простір для розміщення всіх компонентів, а також дозволяють ефективно працювати з високошвидкісними лініями. Крім того, цей розмір надає можливість у майбутньому додавати модифікації або вдосконалення пристрою без зміни його корпусу.

4.5 Ширини провідників ДП

Сигнальні низькошвидкісні лінії

При розводці низькочастотних сигнальних ліній у системі автоматизованого проектування друкованих плат Altium Designer застосовуються стандартні розміри провідників і зазорів між ними (0.127 мм/0.127 мм) відповідно до технологічних можливостей виробництва на PCBWay (рисунки 4.2 та 4.3). Оскільки струми в цих лініях невеликі (десятки-сотні мікроампер), додаткові заходи при розводці зазвичай не потрібні. Проте важливо зберігати певний зазор між провідниками, щоб уникнути перекрестних завад.

Перекрестні завади виникають через неконтрольовані індуктивні або ємнісні взаємодії між сусідніми лініями. Індуктивні завади з'являються, коли зміна струму в одній лінії генерує магнітне поле, яке індуктивно впливає на іншу, викликаючи спотворення сигналу. Ємнісні завади виникають унаслідок утворення неконтрольованої ємності між сусідніми провідниками, що призводить до небажаного впливу сигналів однієї лінії на іншу.

Для мінімізації перекрестних завад важливо дотримуватися рекомендованих відстаней між сигнальними лініями та оптимально розташовувати їх на платі. Це дозволяє уникнути спотворення сигналів і забезпечити стабільну роботу системи [6] [7] [8] [10].

Single pieces Panel by Customer Panel by PCBWay

1 2 3 4 5 6 e.g.

50 X 50 mm inch↔mm

10 pcs

1 Layer 2 Layers 4 Layers 6 Layers 8 Layers 10 Layers 12 Layers 14 Layers

FR-4 Aluminum Rogers HDI(Buried/blind vias) Copper Base

*Material model can be remarked below. HDI is available for 4-layer or more.

TG 130-140 TG 150-160 TG 170-180 S1000H TG150 S1000-2M TG170

*Base material with high TG has good CAF resistance, high heat resistance, dimensional stability and is suitable for lead-free soldering process. [Download Material Report] [Compared with previous material parameters]

0.2 0.3 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.6 2.0 2.4 2.6 2.8 3.0 3.2

≥1.7-8.0 * Unit: mm

3/3mil 4/4mil 5/5mil 6/6mil 8/8mil

0.15mm 0.2mm 0.25mm 0.3mm 0.8mm 1.0mm No Drill

4-5 days	10	\$82.37
Express 48hours	10	\$191.67
Express 72hours	10	\$139.73

Final price is subject to our review.

Shipping Cost: \$19.98

UNITED STATES OF AMERICA

DHL 2-4 business days, wt.0.09kg

Shipment Date: 2024/12/12 AM Delivery Date: 2024/12/15

PCB Cost: \$82.37
V3 Member 3% OFF: -\$2.47
Shipping: \$19.98
Total: \$99.88

Notice: Customs duties and VAT are not included!

Save to Cart

Рисунок 4.2 — Вартість друкованої плати з шириною провідників 0.154 мм і зазором між ними 0.154 мм.

Board type: Single pieces Panel by Customer Panel by PCBWay

Different design in panel: 1 2 3 4 5 6 e.g.

* Size (single): 50 X 50 mm inch↔mm

* Quantity (single): 10 pcs

Layers: 1 Layer 2 Layers 4 Layers 6 Layers 8 Layers 10 Layers 12 Layers 14 Layers

Material: FR-4 Aluminum Rogers HDI(Buried/blind vias) Copper Base

*Material model can be remarked below. HDI is available for 4-layer or more.

FR4-TG: TG 130-140 TG 150-160 TG 170-180 S1000H TG150 S1000-2M TG170

*Base material with high TG has good CAF resistance, high heat resistance, dimensional stability and is suitable for lead-free soldering process. [Download Material Report] [Compared with previous material parameters]

Thickness: 0.2 0.3 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.6 2.0 2.4 2.6 2.8 3.0 3.2

≥1.7-8.0 * Unit: mm

Min track/spacing: 3/3mil 4/4mil 5/5mil 6/6mil 8/8mil

Min hole size: 0.15mm 0.2mm 0.25mm 0.3mm 0.8mm 1.0mm No Drill

4-5 days	10	\$82.37
Express 48hours	10	\$191.67
Express 72hours	10	\$139.73

Final price is subject to our review.

Shipping Cost: \$19.98

UNITED STATES OF AMERICA

DHL 2-4 business days, wt.0.09kg

Shipment Date: 2024/12/12 AM Delivery Date: 2024/12/15

PCB Cost: \$82.37
V3 Member 3% OFF: -\$2.47
Shipping: \$19.98
Total: \$99.88

Notice: Customs duties and VAT are not included!

Save to Cart

Рисунок 4.3 — Вартість друкованої плати з шириною провідників 0.127 мм і зазором між ними 0.127 мм.

Згідно з рисунками 4.2 та 4.3, можна побачити, що при зниженні технологічності виробництва вартість друкованих плат не змінюється.

Лінії живлення

Для визначення необхідної ширини провідників живлення використовується формула, наведена у стандарті IPC-2221 [9] [13]:

$$A = \left(\frac{I}{k \cdot \Delta T^{0.44}} \right)^{1.38} \quad (4.2)$$

Де, A — поперечний переріз в ; I — струм в амперах; k — константа для внутрішнього шару 0.024 та 0.048 для зовнішнього шару; — збільшення температури в градусах Цельсія.

$$W = \frac{A}{t \cdot 1.38} \quad (4.3)$$

Де, t — товщина міді у Oz; W — ширина провідника у mill.

Для визначення мінімальної ширини провідника при максимальному струмі 3 А у зовнішньому шарі використаємо формулу стандарту IPC-2221:

$$A = \left(\frac{0.45}{0.048 \cdot 10^{0.44}} \right)^{1.38} = 74.32 \text{ mill}^2$$

$$W = \frac{74.32}{1 \cdot 1.38} = 53.85 \text{ mill}$$

Мінімальна ширина лінії живлення у зовнішньому шарі в міліметрах становить:

$$W = 0.0254 \cdot 53.85 = 1.37 \text{ мм}$$

Для визначення мінімальної ширини провідника при максимальному струмі 0.5 А у внутрішньому шарі використаємо формулу стандарту IPC-2221:

$$A = \left(\frac{0.5}{0.024 \cdot 10^{0.44}} \right)^{1.38} = 16.32 \text{ mill}^2$$

$$W = \frac{16.32}{1 \cdot 1.38} = 11.83 \text{ mill}$$

Мінімальна ширина лінії живлення у внутрішньому шарі в міліметрах становить:

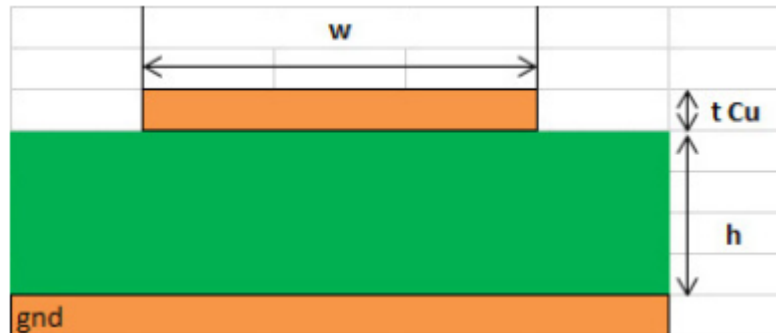
$$W = 0.0254 \cdot 11.83 = 0.3 \text{ мм}$$

| Розрахунок ширини високочастотних ліній

Для обчислення хвильового опору мікросмушкової лінії (рисунок 4.4) [9] [12] використовуємо наступну формулу:

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \cdot \ln \left(\frac{5.98 \cdot h}{0.8 \cdot W + T} \right) \quad (4.4)$$

Де, Z_0 — хвильовий опір; ε_r — ефективна діелектрична проникність матеріалу підкладки; h — висота діелектричного шару; W — ширина провідника; T — товщина металевого шару.



Рисунко 4.4 — Мікросмужкова лінія на друкованій платі

Виведемо значення мікросмужкової лінії із рівняння (4.4).

$$W = 1.25 \cdot \left(\frac{5.98 \cdot h}{e^{\frac{Z_0 \cdot \sqrt{\varepsilon_r + 1.41}}{87}}} - T \right) \quad (4.5)$$

Для розрахунку вхідного тракту із хвильовим опором 50 Ом при $\varepsilon_r = 2.8$, $h = 0.11$ мм та $T = 0.035$ мм застосуємо формулу 4.5:

$$W = 1.25 \cdot \left(\frac{5.98 \cdot 0.11}{e^{\frac{50 \cdot \sqrt{2.8 + 1.41}}{87}}} - 0.035 \right) \approx 0.224 \text{ мм}$$

Для розрахунку вихідного тракту із хвильовим опором 50 Ом при $\varepsilon_r = 2.8$, $h = 0.11$ мм та $T = 0.035$ мм застосуємо формулу 4.5:

$$W = 1.25 \cdot \left(\frac{5.98 \cdot 1.42}{e^{\frac{50 \cdot \sqrt{2.8 + 1.41}}{87}}} - 0.035 \right) \approx 3.22 \text{ мм}$$

4.6 Трасування друкованої плати

Розводка провідників на друкованій платі виконувалася за допомогою програмного забезпечення Altium Designer. Перед початком трасування були встановлені правила проектування, які відповідають можливостям виробництва компанії PCBWay, обраної для виготовлення плати. Зокрема, враховувалися мінімальні розміри провідників, зазори між ними.

На рисунку 4.5 показано верхній шар металізації, де розташовані високошвидкісні лінії та всі компоненти поверхневого монтажу (SMD). Особливу увагу приділено трасуванню високошвидкісних ліній для забезпечення узгодження хвильового опору та зменшення перекрестних завад.

Перший внутрішній шар металізації, представлений на рисунку 4.6, виконує роль неперервного шару заземлення. Цей шар забезпечує стабільний шлях для зворотних струмів, зменшує електромагнітні завади та сприяє узгодженню високочастотних ліній.

Другий внутрішній шар металізації, наведений на рисунку 4.7, використовується для розведення живлення. Така конфігурація забезпечує рівномірний розподіл напруги по всій платі, підтримуючи стабільність роботи електронних компонентів.

На рисунку 4.8 показано нижній шар металізації, де розведені низькочастотні сигнальні лінії.

Кожен шар металізації виконує чітко визначені функції, спрямовані на ефективний розподіл сигналів, живлення та заземлення. Завдяки дотриманню сучасних правил проектування, багатошарова структура плати забезпечує високу якість передачі сигналів, мінімізацію завад і стабільну роботу пристрою (рисунки 4.5, 4.6, 4.7 та 4.8) [14] [15] [16].

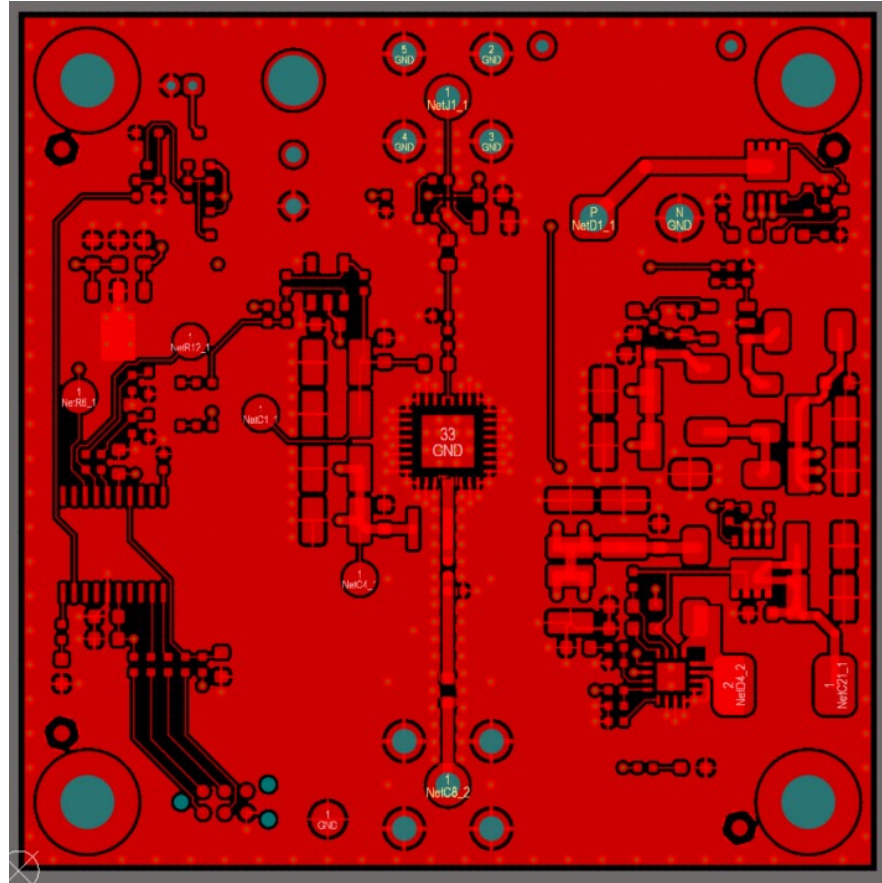


Рисунок 4.5 — Верхній шар металізації

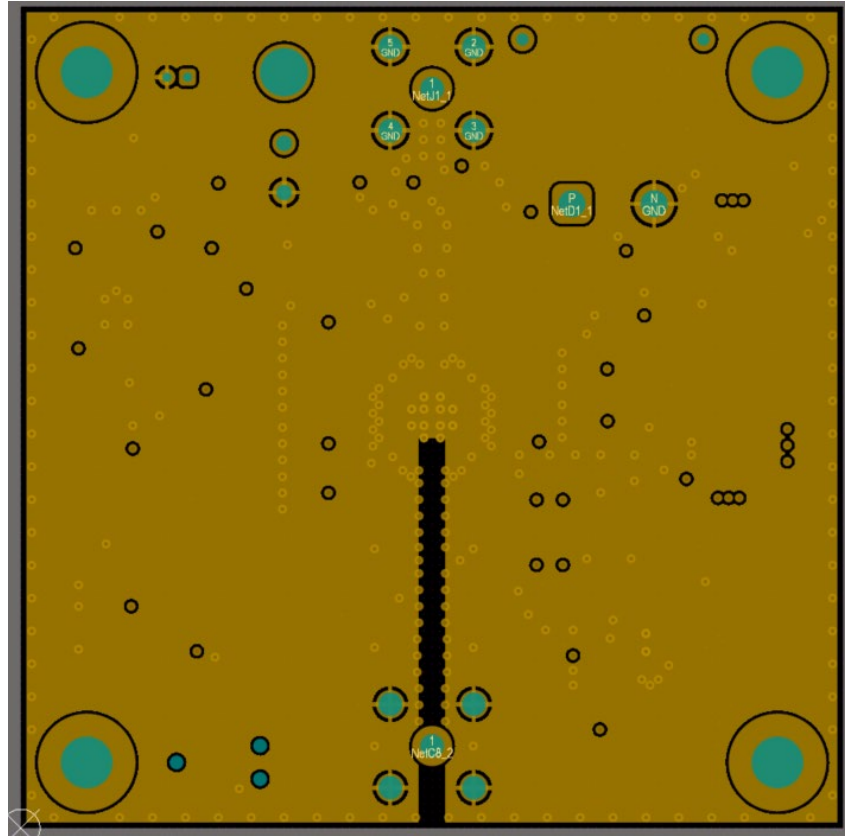


Рисунок 4.6 — перший внутрішній шар металізації

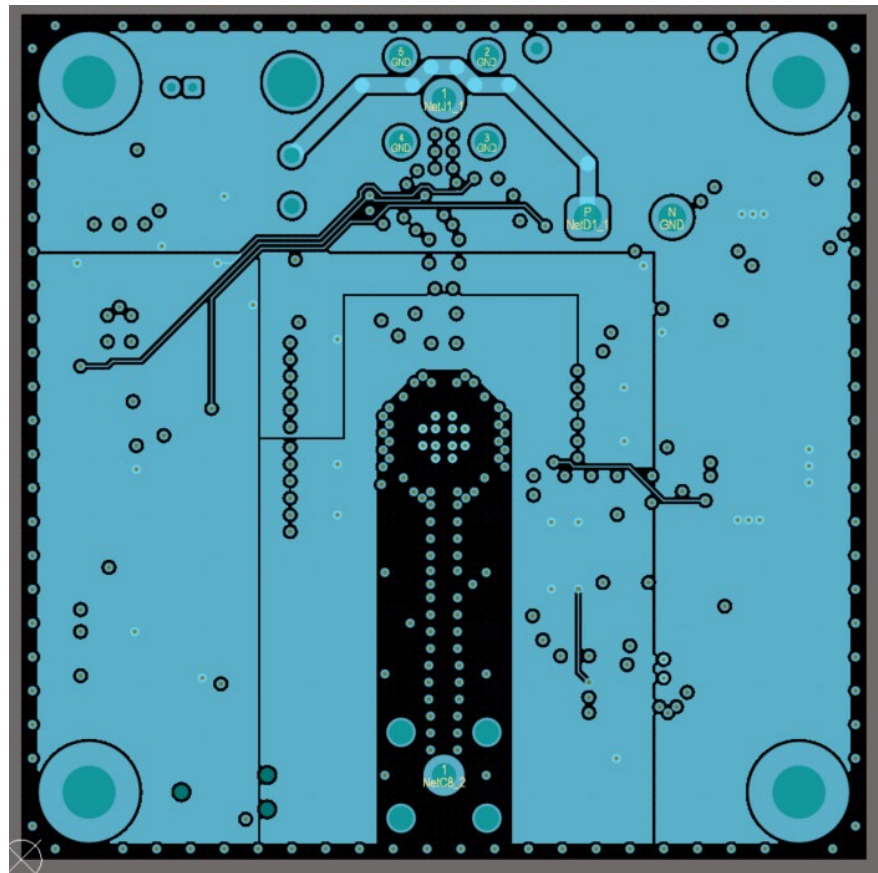


Рисунок 4.7 — Другий внутрішній шар металізації

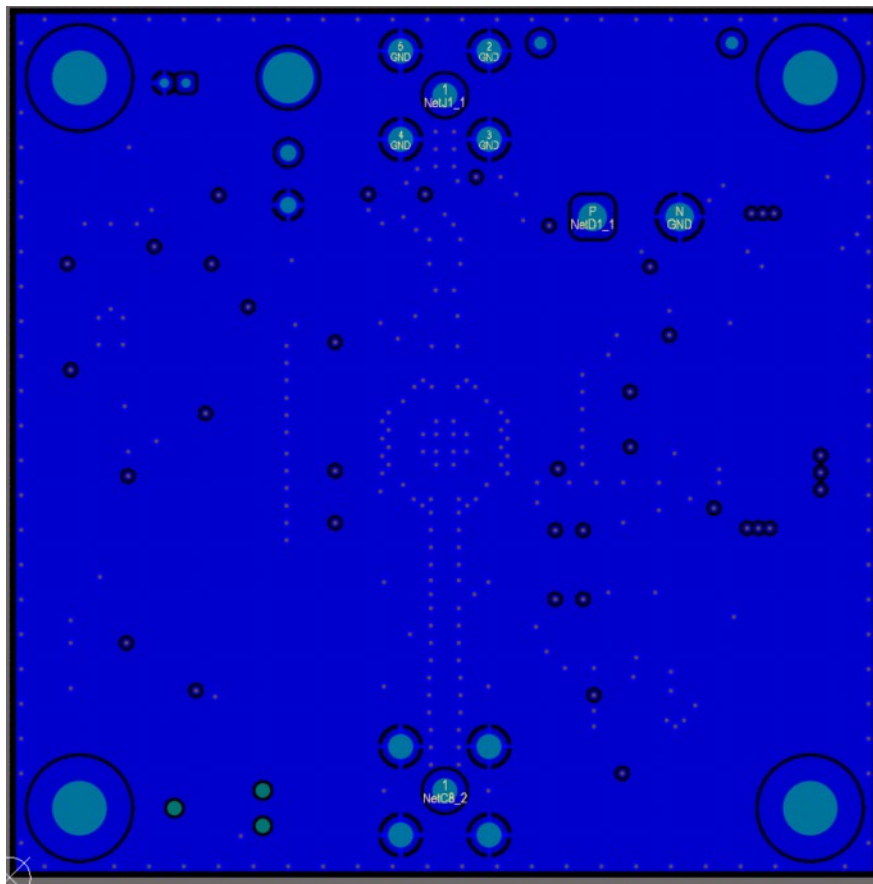


Рисунок 4.8 — Нижній шар металізації
Розроблена друкована плата (рисунок 4.9) має наступний вигляд:

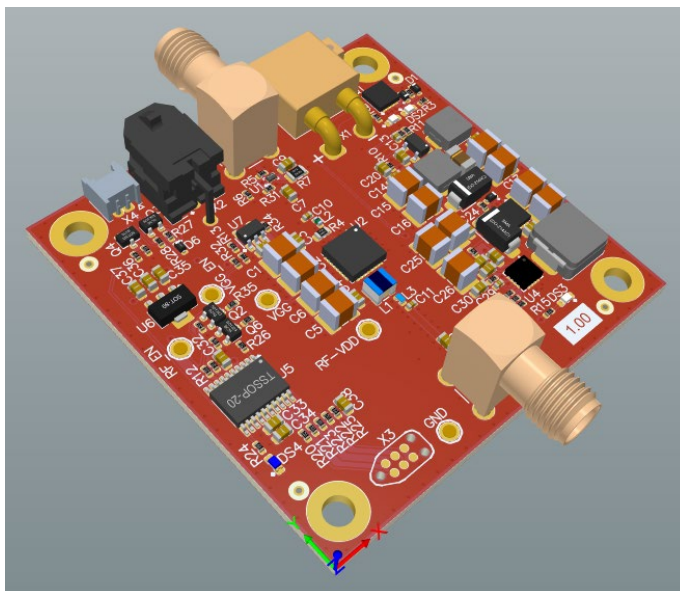


Рисунок 4.9 – Розроблена ДП в середовищі Altium Designer

4.7 Розрахунок надійності

Для аналізу надійності друкованої плати проведемо розрахунок часу безвідмовної роботи. Розрахунок базується на законі експоненційного

розподілу. Для цього необхідно визначити інтенсивність відмов кожного елемента окремо.

Щоб змодельовати критичні умови роботи пристрою, приймаємо робочу температуру 40°C . Оскільки пристрій використовується в побутових умовах і є переносним, коефіцієнт експлуатації приймаємо рівним $K_E = 7$, а коефіцієнт температури становить $K_t = 4.4$, виходячи з робочої температури 40°C .

Інтенсивність відмов розраховується для кожної групи елементів із урахуванням відповідних коефіцієнтів за формулою:

$$\lambda_p = \lambda_0 \cdot K_1 \cdot K_t \cdot K_e \cdot N \quad (4.8)$$

Де, λ_0 — середньо статистична інтенсивність відмов; K_1 — поправочний коефіцієнт, що враховує теплове та електричне навантаження групи елементів; K_e — коефіцієнт експлуатації; K_t — температурний коефіцієнт.

Результати розрахованих ймовірностей відмов елементів пристрою внесено до таблиці 4.1. У таблиці представлено інтенсивність відмов кожного елемента, значення коефіцієнтів температури та експлуатації, а також отримані ймовірності відмов для кожної групи елементів. Це дозволяє наочно оцінити вплив різних компонентів на загальну надійність пристрою.

Таблиця 4.1 — Таблиця ймовірностей відмови елементів

Тип та назва елемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6},$ $\frac{1}{\text{год}}$	$N, \text{шт.}$	K_1	K_e	$\lambda_p \cdot 10^{-6},$ $\frac{1}{\text{год}}$
Чіп-резистор	0.06	39	0.6	0.6	4.9
Чіп-конденсатор	0.06	41	0.26	0.45	5.8
Мікросхема напівпровідникова	3	6	1	0.75	18
Роз'єми	1	6	0.4	0.5	1.7

Діоди	0.6	6	0.3	0.3	1.4
Дроселі	0.033	6	0.3	0.6	0.4
Польові кремнієві транзистори	0.065	6	0.4	0.5	0.2

Для розрахунку потоку відмов групи елементів використаємо формулу:

$$\omega = \sum_{i=1}^n \lambda_p \cdot N_i \quad (4.9)$$

Де, ω — потік відмов компонентів, $\frac{1}{\text{год}}$

$$\omega = 32.99 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$$

Розрахувавши інтенсивність відмови для кожної групи компонентів, отримуємо, що при такій комплектації потік відмов друкованої плати становить $32.99 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$. Визначимо середній час напрацювання на відмову за допомогою формули:

$$T_0 = \frac{1}{\omega} \quad (4.10)$$

Де, T_0 — час напрацювання на відмову, год.

$$T_0 = \frac{1}{32.99 \cdot 10^{-6}} = 30312 \text{ год}$$

Отже, час безвідмовної роботи становить 30312 годин.

5 РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИЛАДУ

5.1 Опис використанного обладнання та схеми підключення

Після складання пристрою та перевірки силової частини можна розпочати тестування підсилення (рисунок 5.1).

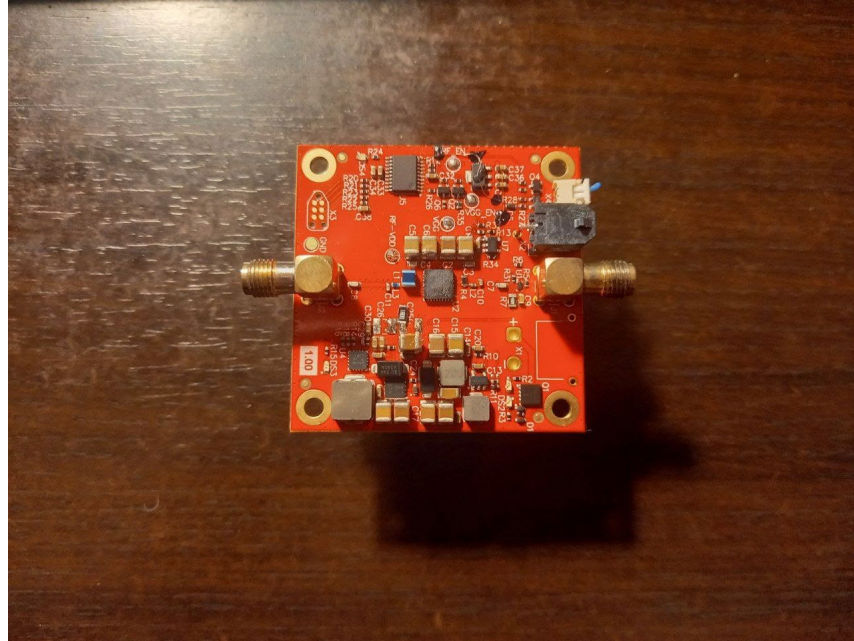


Рисунок 5.1 – зібраний розроблений прилад

Як вхідний генератор високочастотних сигналів було використано інший пристрій (рисунок 5.2). Цей пристрій генерує LORA пакети даних у діапазоні частот 150МГц – 1ГГц.

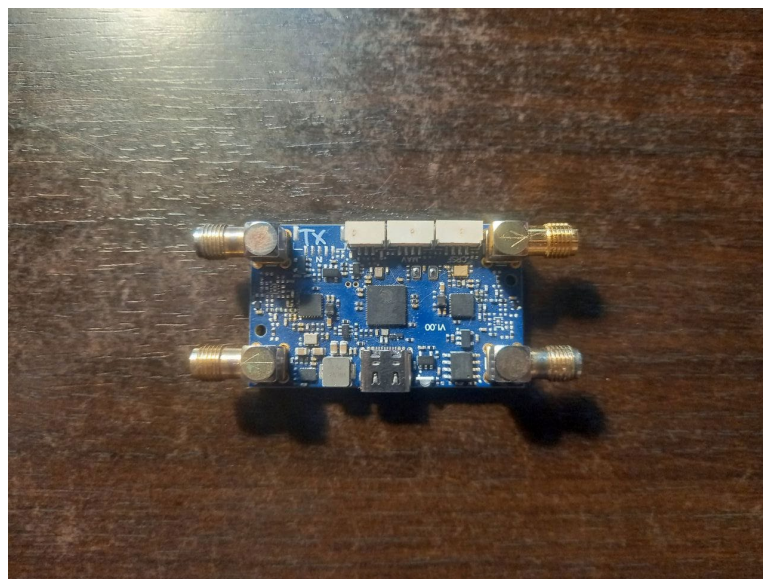


Рисунок 5.2 – зібраний розроблений прилад

Використовуючи аналізатор сигналів Agilent E4406A (рисунок 5.3), знімемо характеристики сигналу від джерела, попередньо підключивши його до вимірювача через атенюатор із затуханням 30 дБ (рисунок 5.4). Це затухання було внесено в аналізатор сигналів як зовнішній атенюатор.

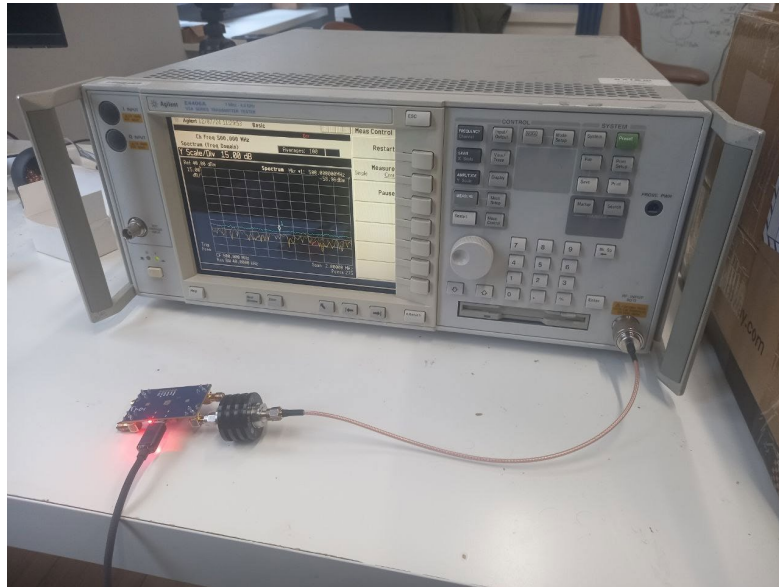


Рисунок 5.3 – Підключення генератора сигналів до аналізатору сигналів використовуючи атенюатор



Рисунок 5.4 - Використаний атенюатор 30дБ, 10Вт

Для вимірювання потужності із підсилювачем був використаний наступний стенд (рисунок 5.5):

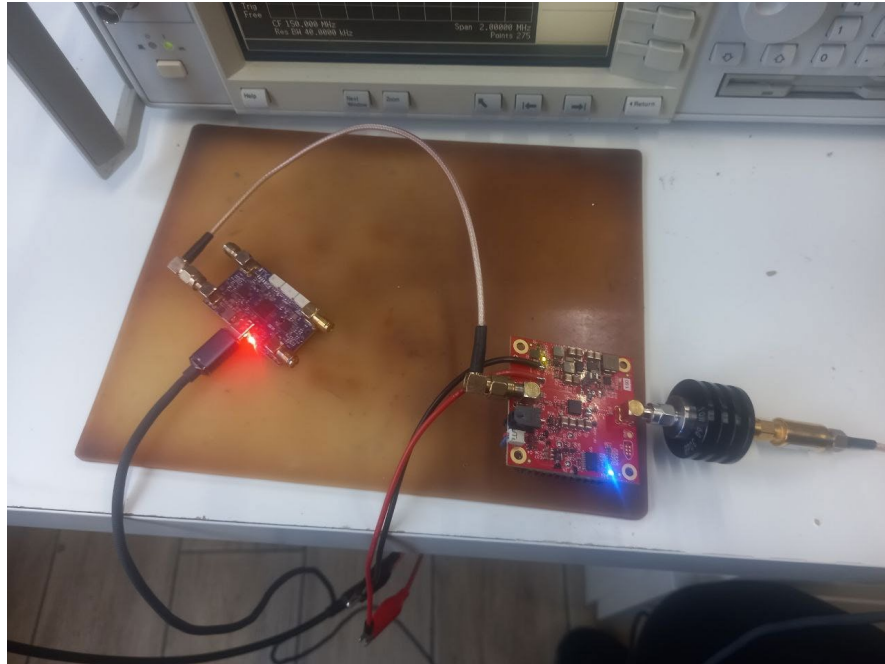


Рисунок 5.5 – Підключення підсиленого високочастотного сигналу до аналізатору сигналів.

Для підключення підсиленого сигналу до аналізатора було використано два послідовно з'єднаних атенюатори із сумарним затуханням сигналу 50 дБ (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 - два послідовних атенюатори із сумарним затуханням сигналу
50дБ

Також, використовуючи векторний аналізатор було визначено фактичні втрати на кабелях підключення та атенюаторах (рисунок 5.7):

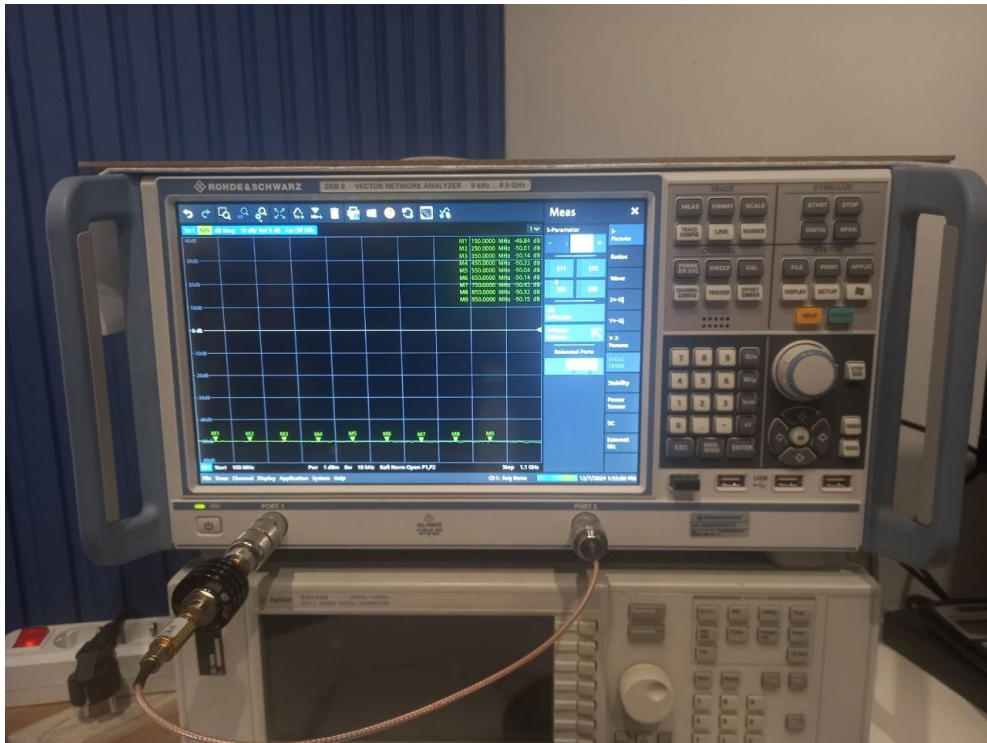


Рисунок 5.7 – Вимір фактичних втрат на атенуаторній збірці та кабелях.

Видно, що втрати в частотному діапазоні 150МГц – 1ГГц в проміжку між -49.84дБ - -50.22дБ. Отже, візьмемо за середнє значення послаблення сигналу -50дБ.

5.2 Зняття характеристик підсилення

Всі отриманні значення вимірювання наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – таблиця залежності вхідної та вихідної потужності сигналу від частоти

Частота сигналу, МГц	Потужність вхідного сигналу, дБм	Потужність вихідного сигналу, дБм	Потужність вихідного сигналу, Вт
150	17.83	38.26	6.7
200	18.07	37.35	5.43
250	18.18	36.66	4.65
300	18.73	38.36	6.85
350	19.18	37.27	6.72

400	19.69	37.87	6.12
450	19.82	37.04	5.06
500	19.93	34.55	2.85
550	19.26	35.73	3.74
600	19.00	36.18	4.15
650	19.06	37.14	5.18
700	18.53	37.07	5.09
750	18.40	36.05	4.03
800	18.94	37.55	5.69
850	18.54	37.92	6.19
900	18.83	38.38	6.89
950	19.22	38.56	7.18
1000	19.87	37.81	6.04

Тестування на частоті 150 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 150 МГц 17.83дБм з джерела сигналів (рисунок 5.8).

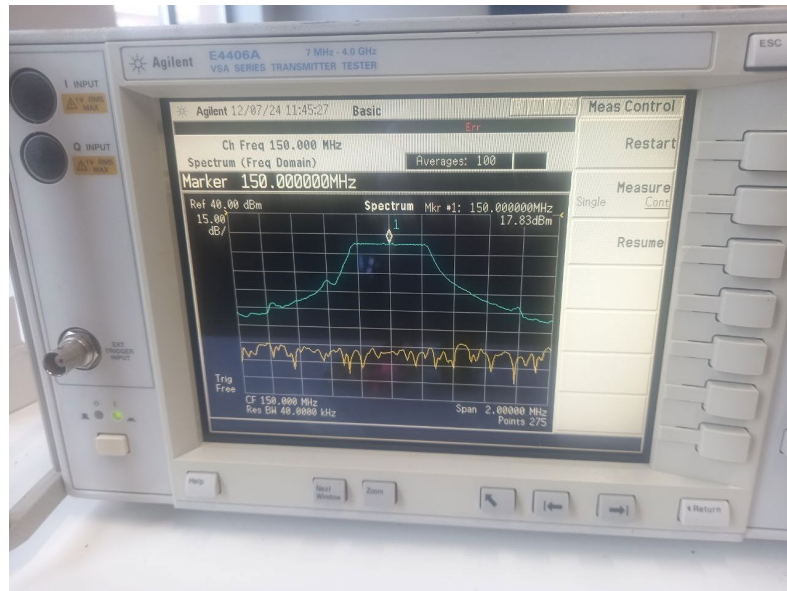


Рисунок 5.8 – Спектр потужності сигналу на частоті 150 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 150 МГц 38.26дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.9).

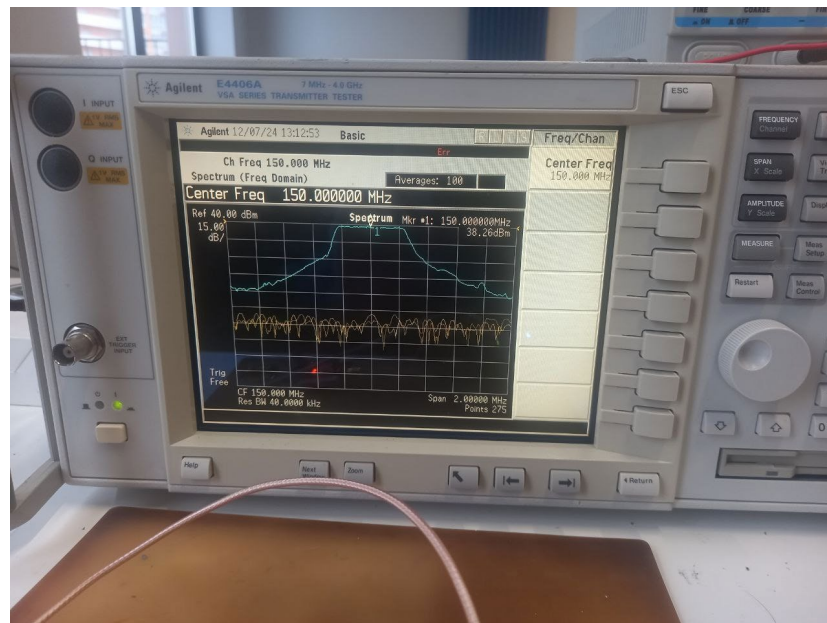


Рисунок 5.9 – Спектр потужності сигналу на частоті 150 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

|Тестування на частоті 200 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 200 МГц 18.07дБм з джерела сигналів (рисунок 5.10).

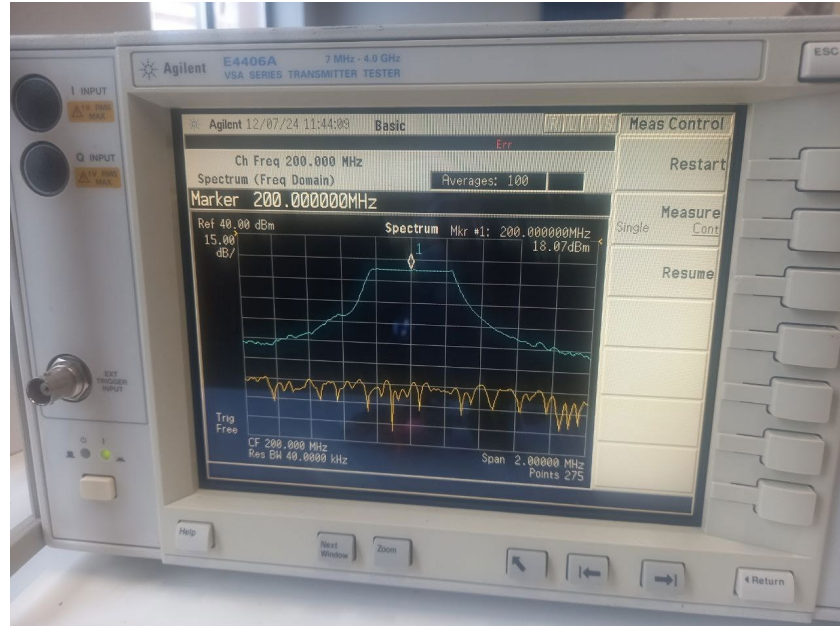


Рисунок 5.10 – Спектр потужності сигналу на частоті 200 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 200 МГц 37.35дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.11).

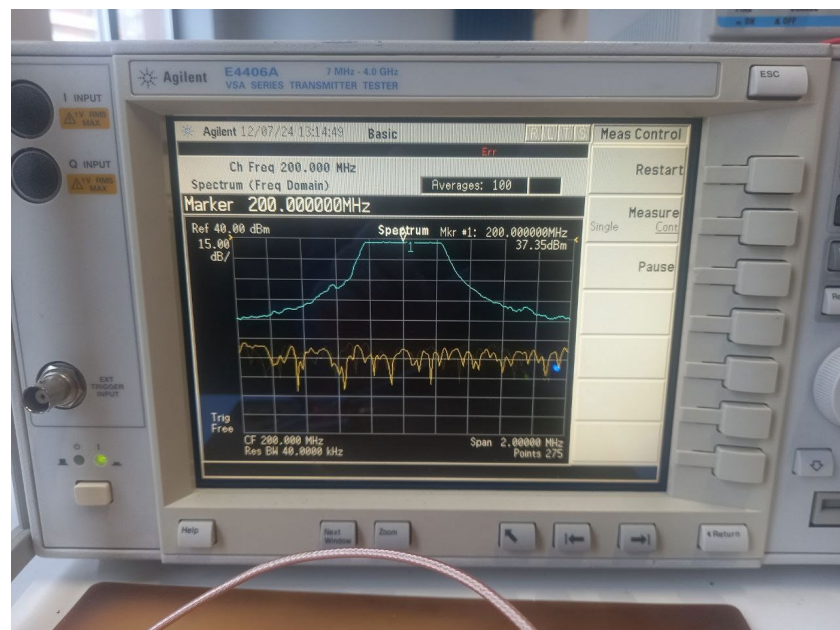


Рисунок 5.11 – Спектр потужності сигналу на частоті 200 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 250 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 250 МГц 18.18дБм з джерела сигналів (рисунк 5.12).

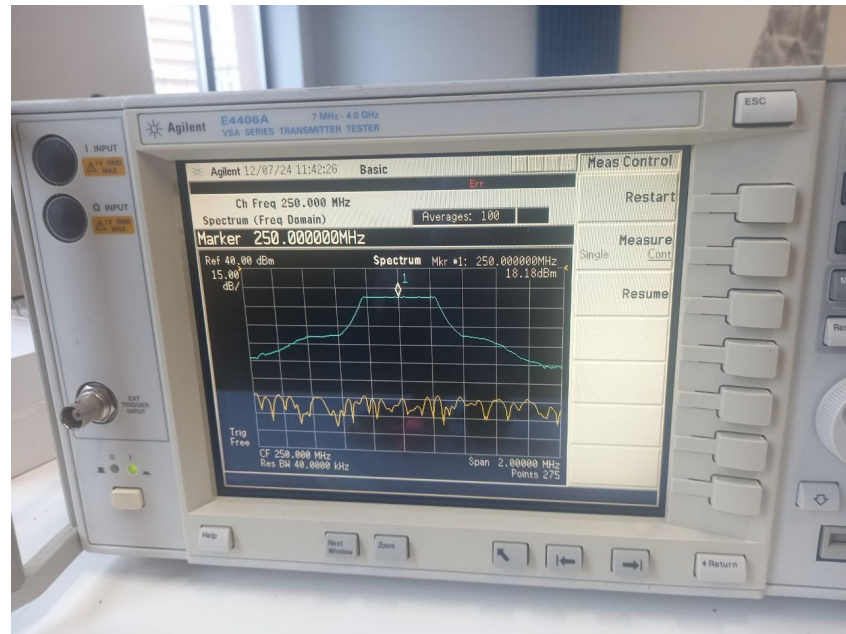


Рисунок 5.12 – Спектр потужності сигналу на частоті 250 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 250 МГц 36.66дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунк 5.13).

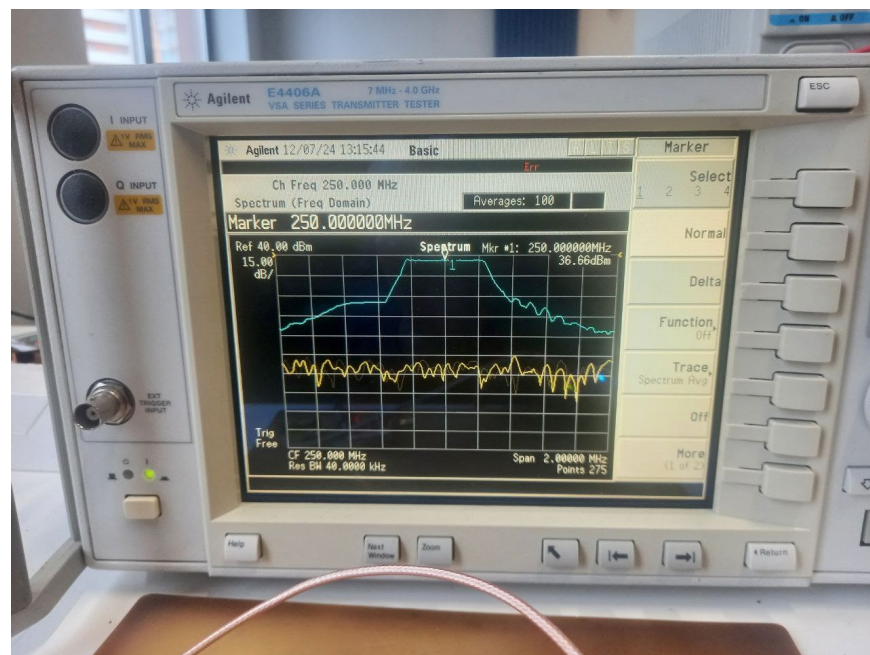


Рисунок 5.13 – Спектр потужності сигналу на частоті 250 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 300 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 300 МГц 18.73дБм з джерела сигналів (рисунок 5.14).

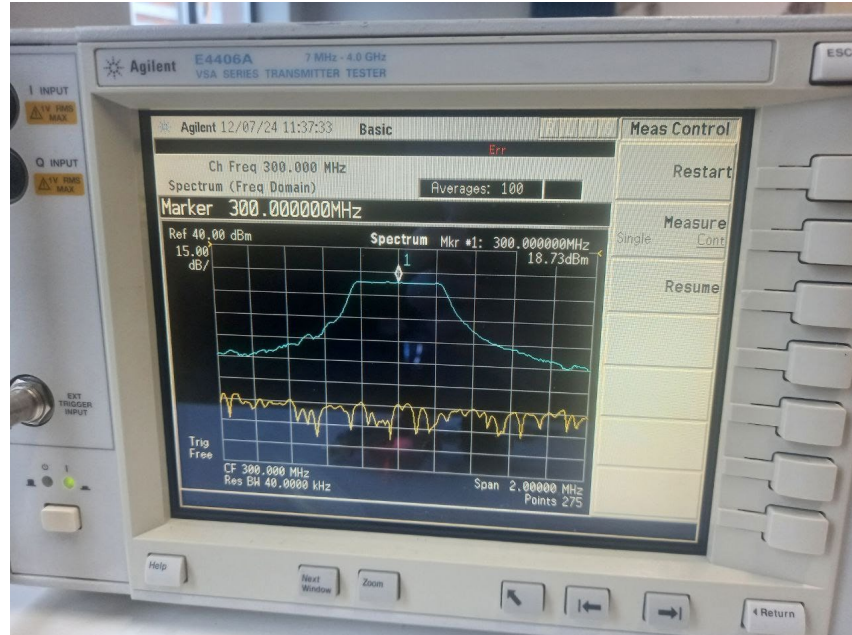


Рисунок 5.14 – Спектр потужності сигналу на частоті 300 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 300 МГц 38.36дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.15).

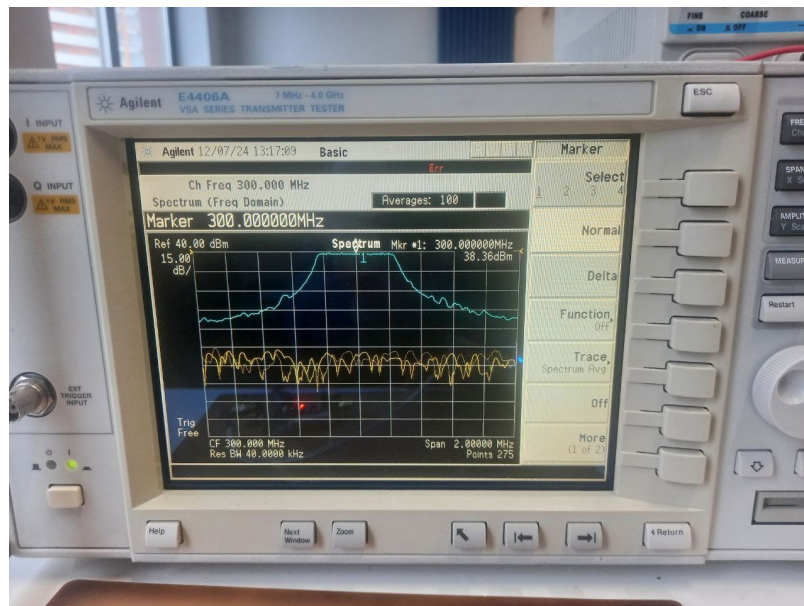


Рисунок 5.15 – Спектр потужності сигналу на частоті 300 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

| Тестування на частоті 350 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 350 МГц 19.18дБм з джерела сигналів (рисунок 5.16).

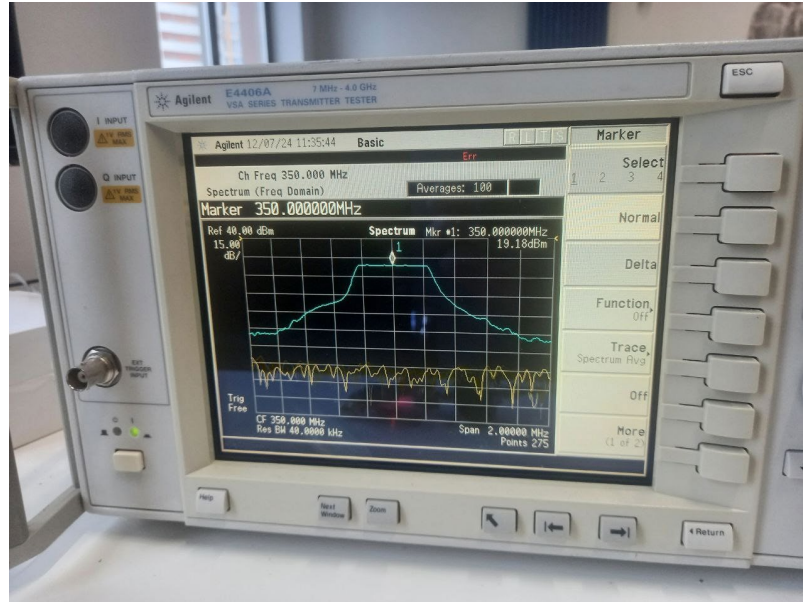


Рисунок 5.16 – Спектр потужності сигналу на частоті 350 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 350 МГц 38.27дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.17).

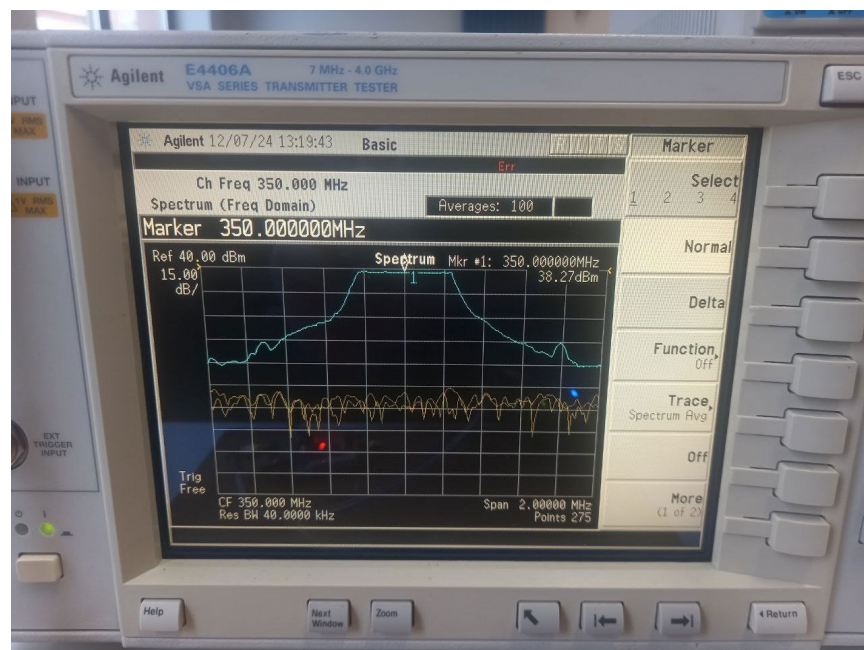


Рисунок 5.17 – Спектр потужності сигналу на частоті 350 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

[Тестування на частоті 400 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 400 МГц 19.69дБм з джерела сигналів (рисунок 5.18).

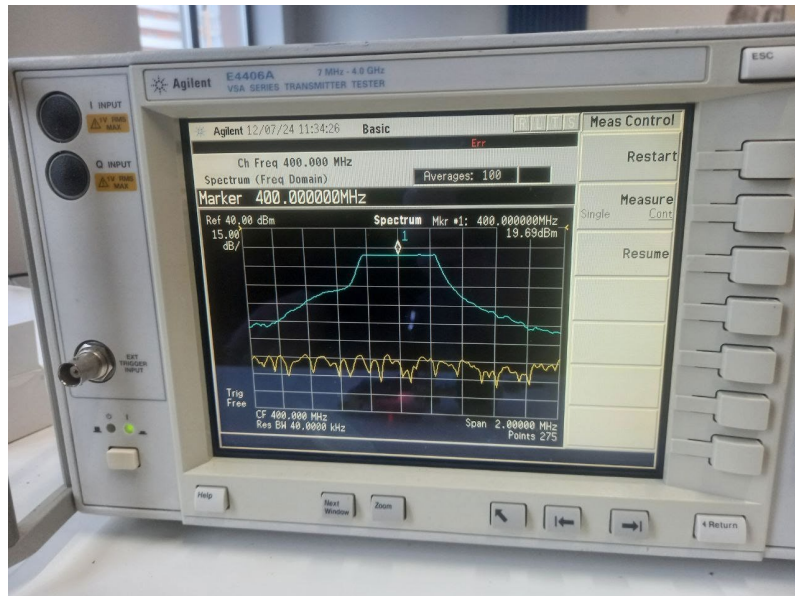


Рисунок 5.18 – Спектр потужності сигналу на частоті 400 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 400 МГц 37.87дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.19).

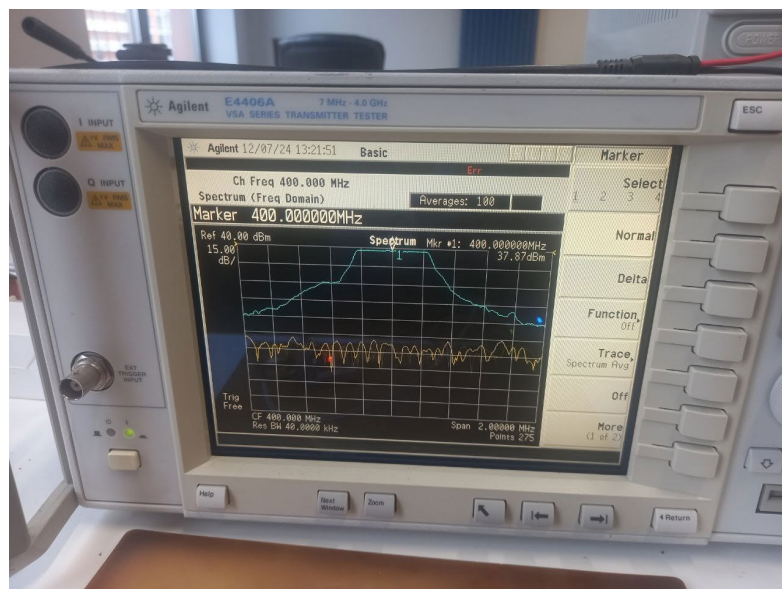


Рисунок 5.19 – Спектр потужності сигналу на частоті 400 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

| Тестування на частоті 450 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 450 МГц 19.82дБм з джерела сигналів (рисунок 5.20).

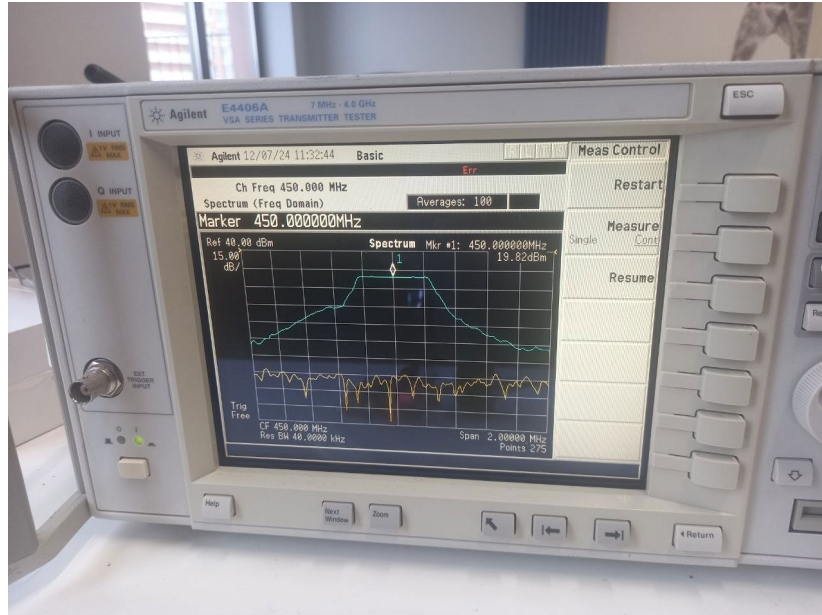


Рисунок 5.20 – Спектр потужності сигналу на частоті 450 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 450 МГц 37.04дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.21).

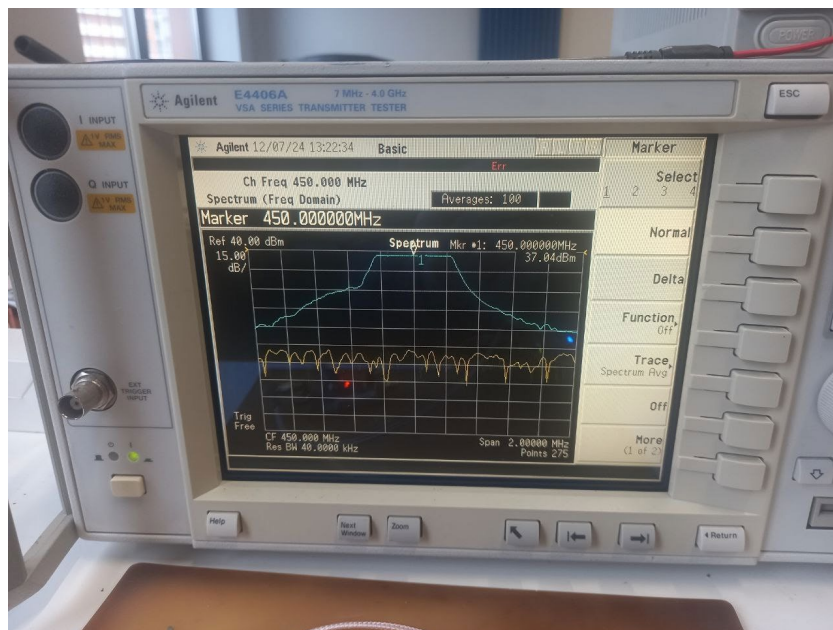


Рисунок 5.21 – Спектр потужності сигналу на частоті 450 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

|Тестування на частоті 500 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 500 МГц 19.93дБм з джерела сигналів (рисунок 5.22).

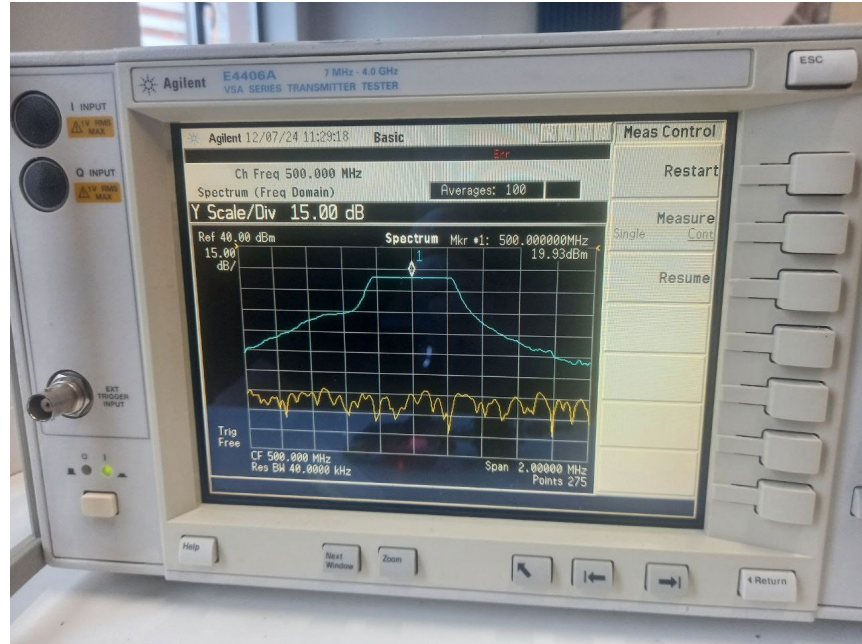


Рисунок 5.22 – Спектр потужності сигналу на частоті 500 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 500 МГц 34.55дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.23).

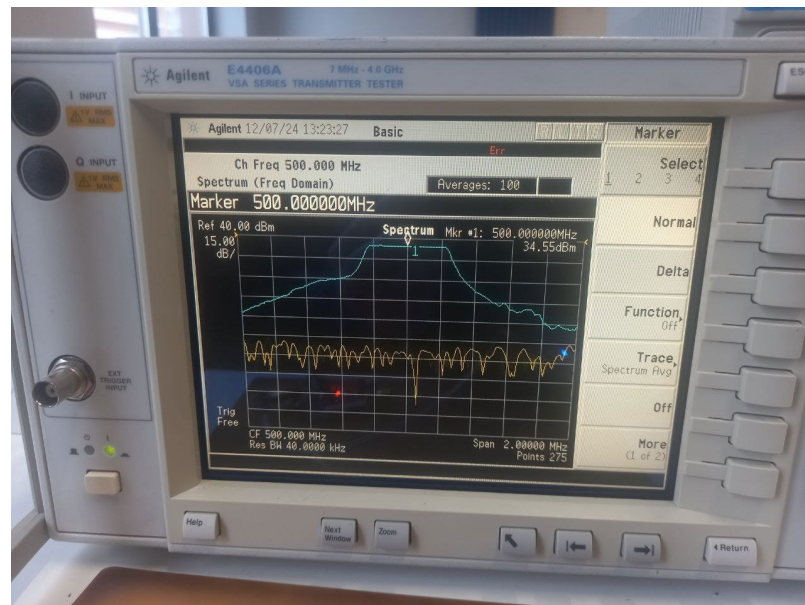


Рисунок 5.23 – Спектр потужності сигналу на частоті 500 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

|Тестування на частоті 550 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 550 МГц 19.26дБм з джерела сигналів (рисунок 5.24).

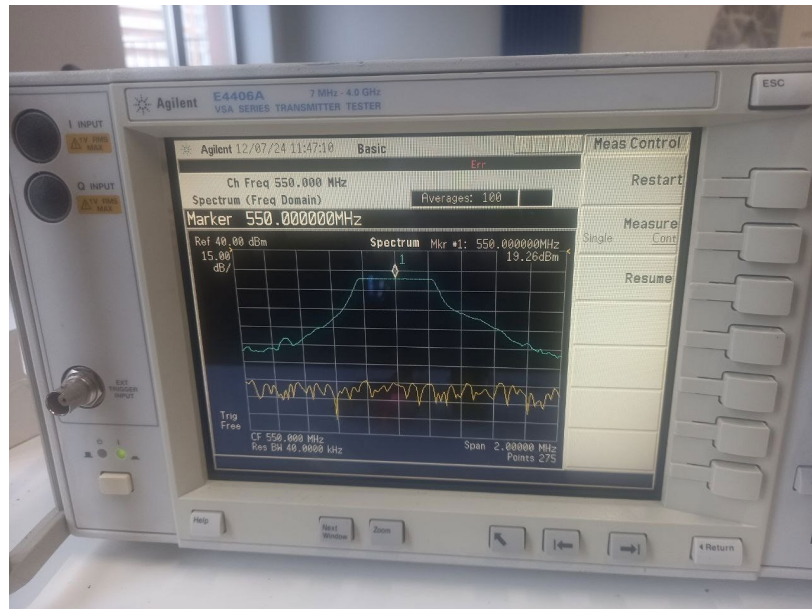


Рисунок 5.24 – Спектр потужності сигналу на частоті 550 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 550 МГц 35.73дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.25).

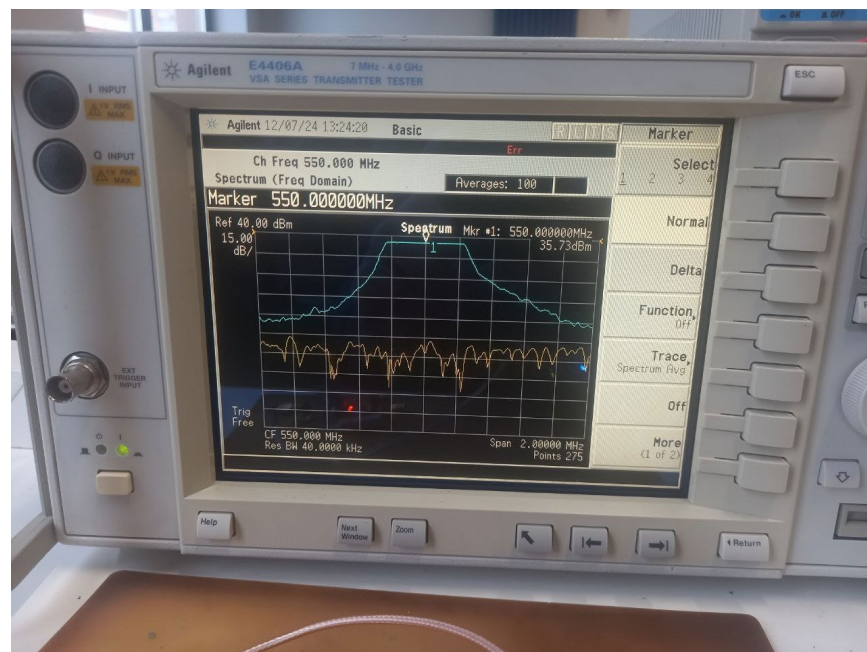


Рисунок 5.25 – Спектр потужності сигналу на частоті 550 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 600 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 600 МГц 19.00дБм з джерела сигналів (рисунок 5.26).

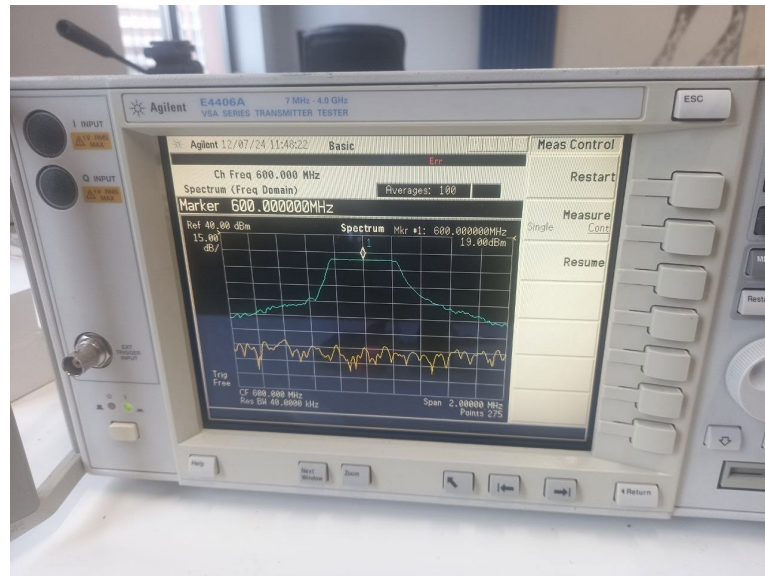


Рисунок 5.26 – Спектр потужності сигналу на частоті 600 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 600 МГц 36.18дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.27).

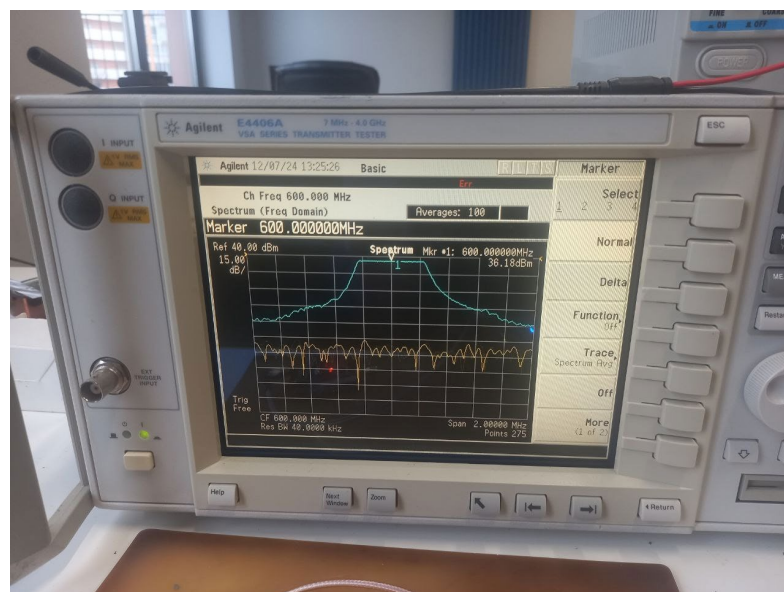


Рисунок 5.27 – Спектр потужності сигналу на частоті 600 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 650 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 650 МГц 19.06дБм з джерела сигналів (рисунок 5.28).

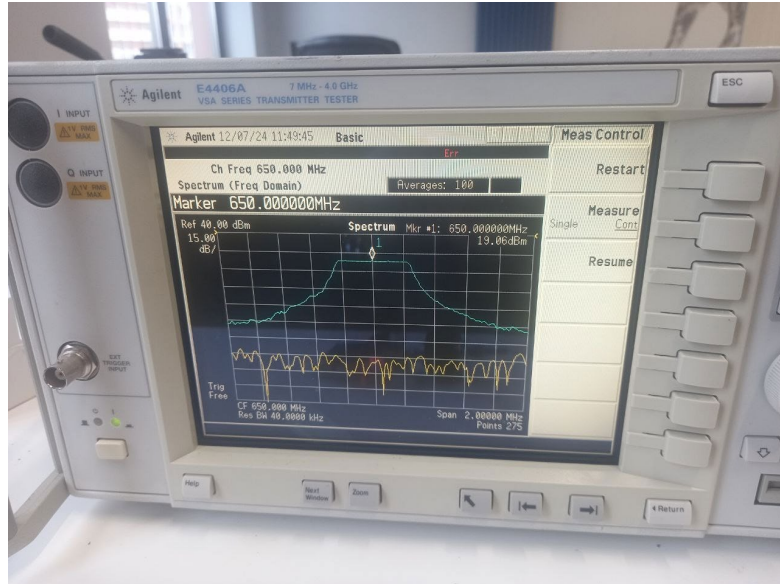


Рисунок 5.28 – Спектр потужності сигналу на частоті 650 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 650 МГц 37.14дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.29).

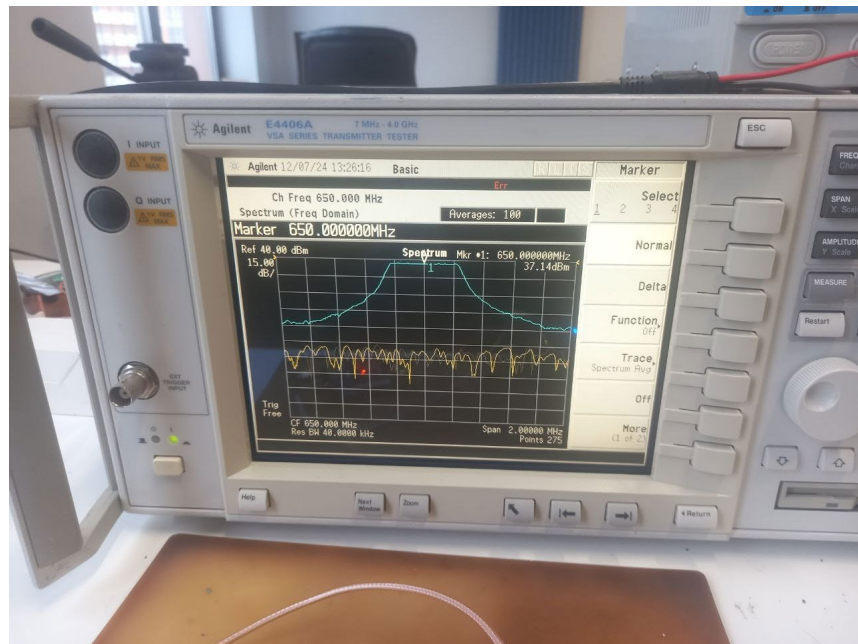


Рисунок 5.29 – Спектр потужності сигналу на частоті 650 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 700 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 700 МГц 18.53дБм з джерела сигналів (рисунок 5.30).

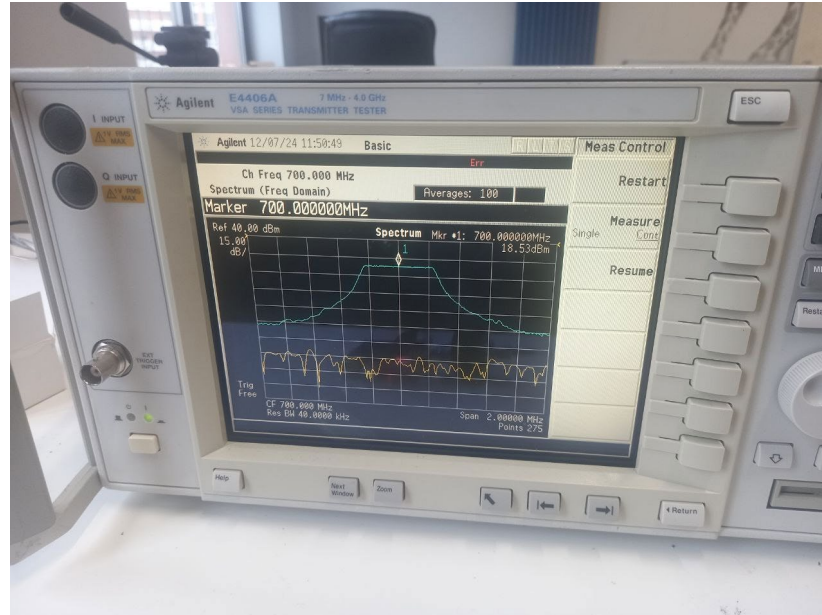


Рисунок 5.30 – Спектр потужності сигналу на частоті 700 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 700 МГц 37.07дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.31).

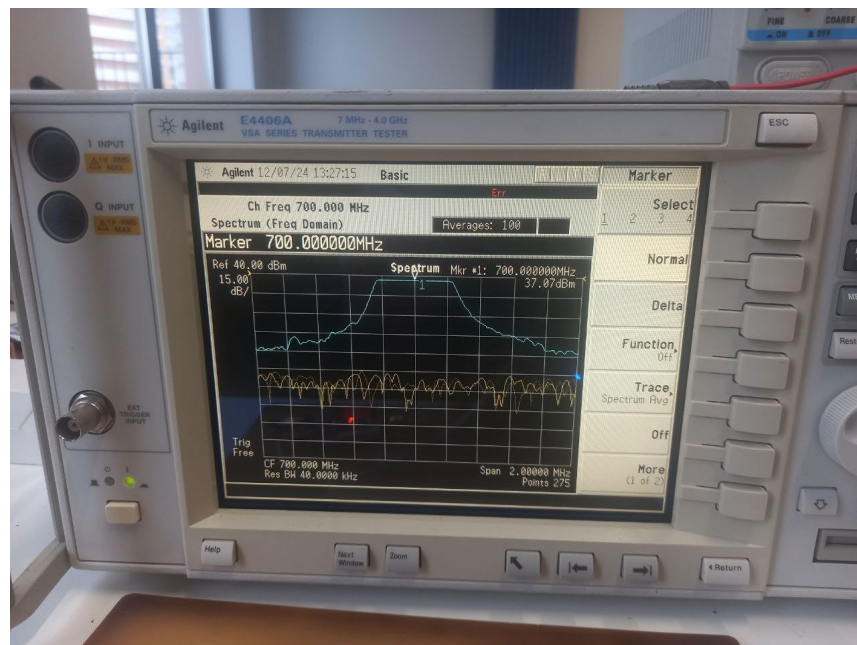


Рисунок 5.31 – Спектр потужності сигналу на частоті 700 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 750 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 750 МГц 18.40дБм з джерела сигналів (рисунок 5.32).

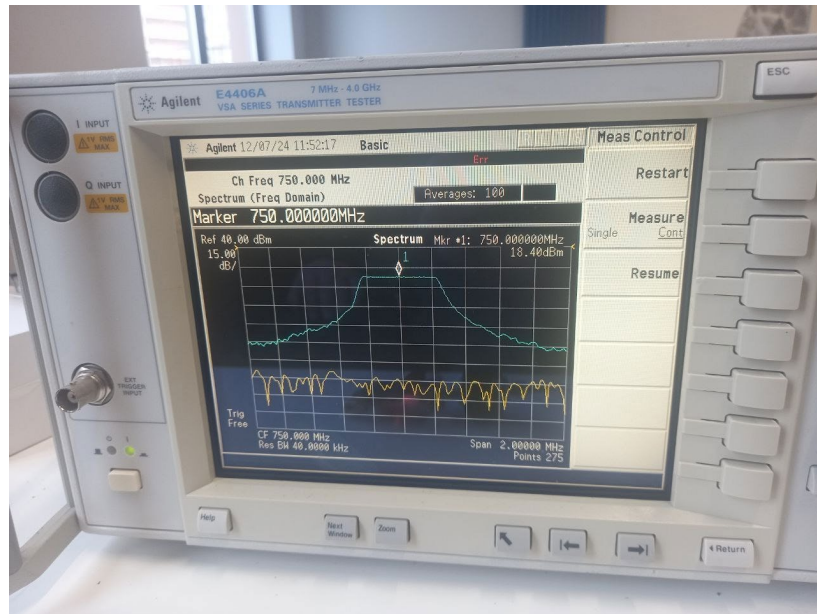


Рисунок 5.32 – Спектр потужності сигналу на частоті 750 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 750 МГц 36.05дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.33).

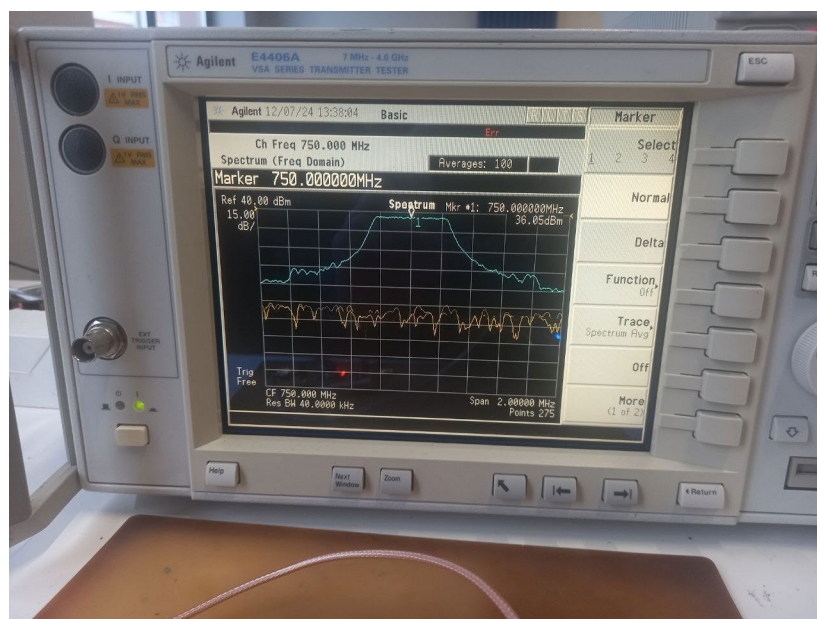


Рисунок 5.33 – Спектр потужності сигналу на частоті 750МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 800 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 800 МГц 18.94дБм з джерела сигналів (рисунок 5.34).

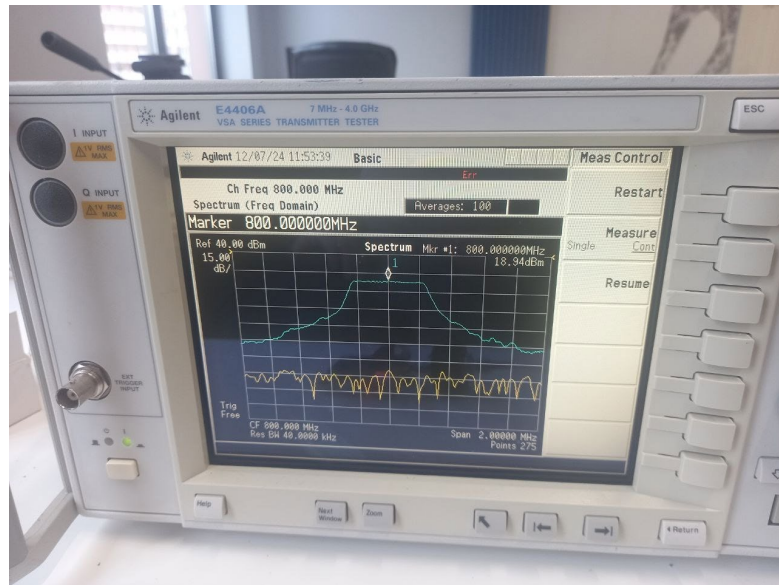


Рисунок 5.34 – Спектр потужності сигналу на частоті 800 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 800 МГц 37.55дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.35).

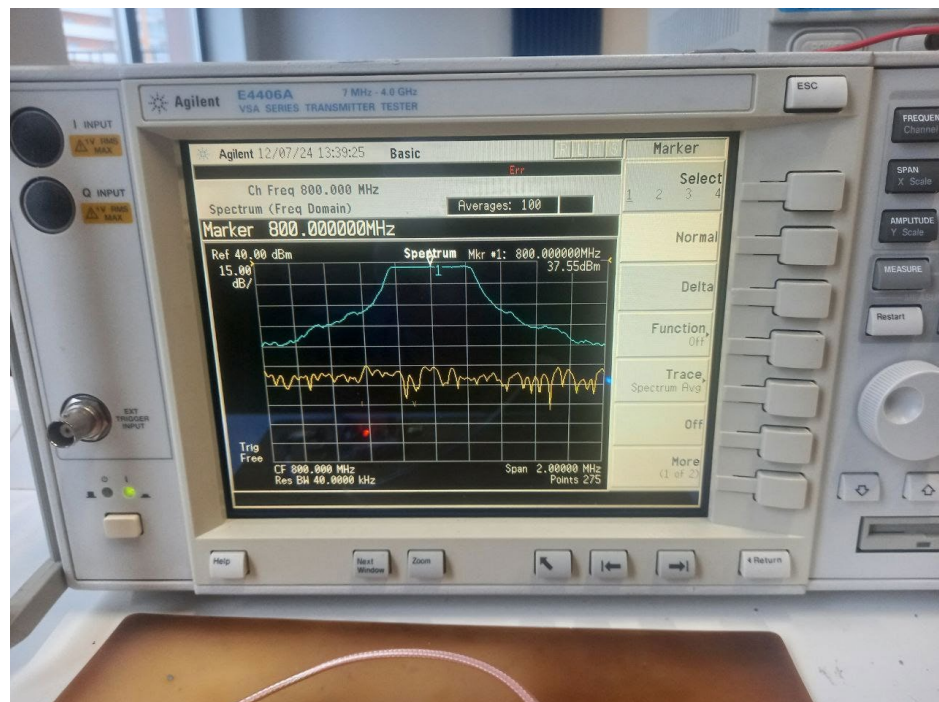


Рисунок 5.35 – Спектр потужності сигналу на частоті 800 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 850 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 850 МГц 18.54дБм з джерела сигналів (рисунк 5.36).

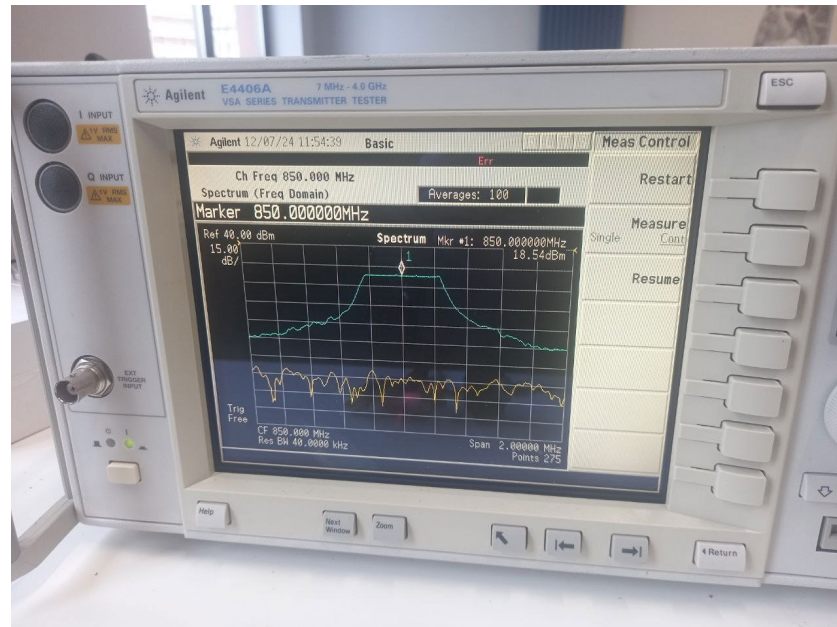


Рисунок 5.36 – Спектр потужності сигналу на частоті 850 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 850 МГц 37.92дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунк 5.37).

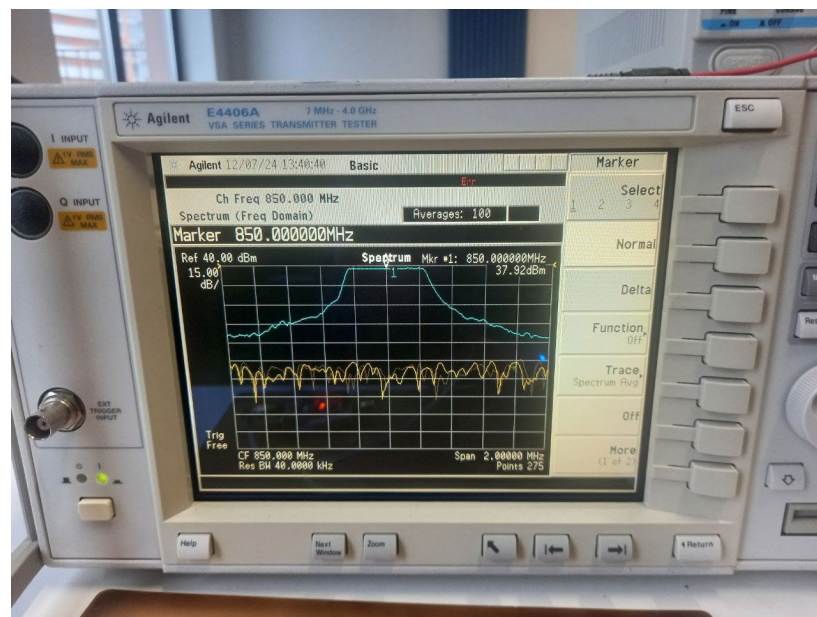


Рисунок 5.37 – Спектр потужності сигналу на частоті 850 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 900 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 900 МГц 18.83дБм з джерела сигналів (рисунок 5.38).

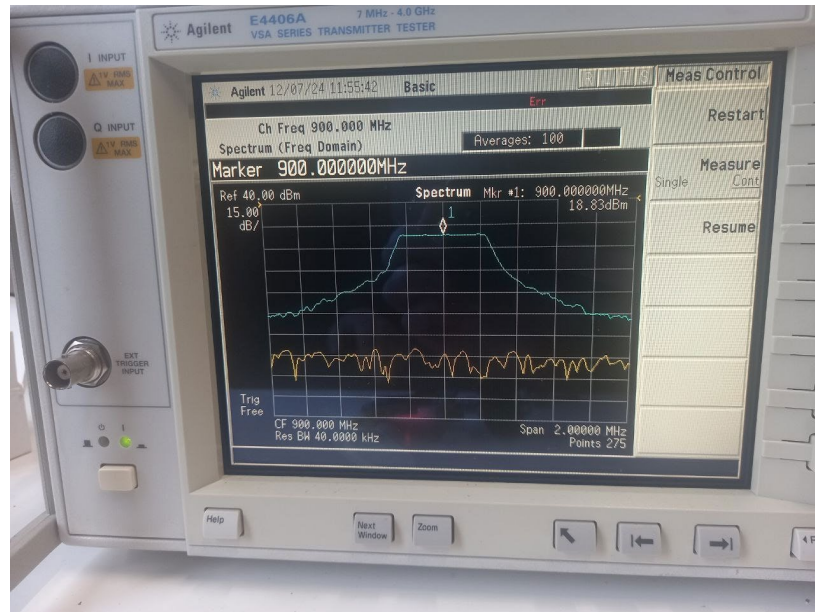


Рисунок 5.38 – Спектр потужності сигналу на частоті 900 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 900 МГц 38.38дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.39).

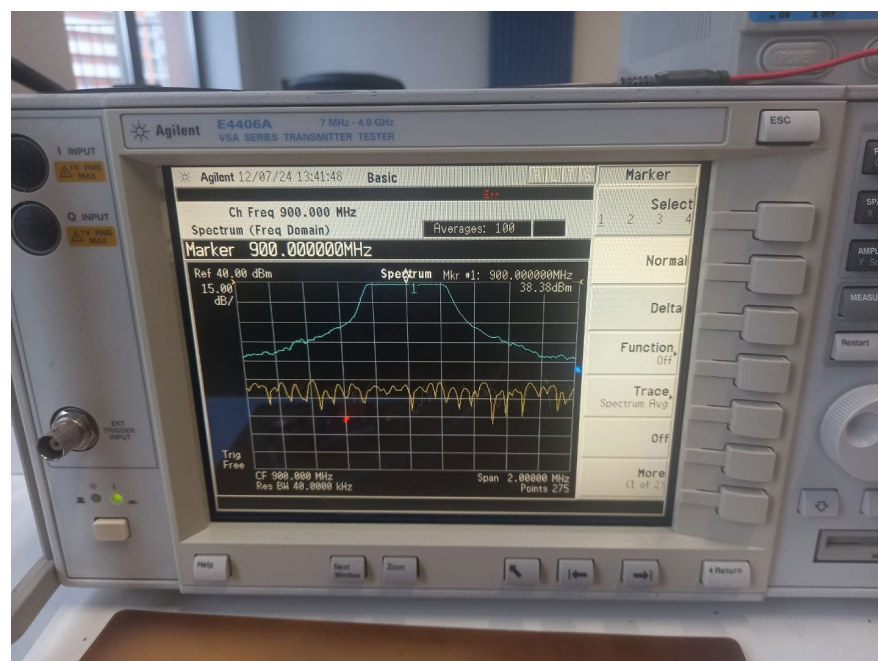


Рисунок 5.39 – Спектр потужності сигналу на частоті 900 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 950 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 950 МГц 19.22дБм з джерела сигналів (рисунок 5.40).

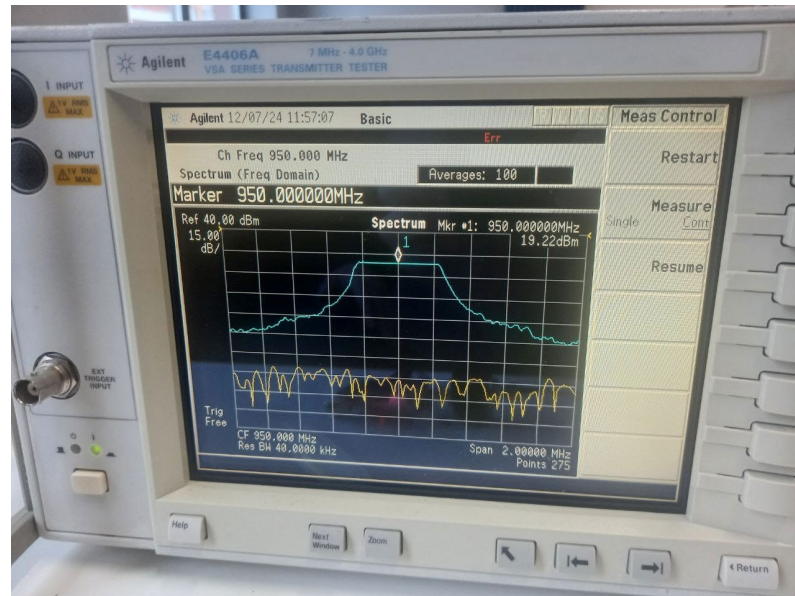


Рисунок 5.40 – Спектр потужності сигналу на частоті 950 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 950 МГц 38.56дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.41).

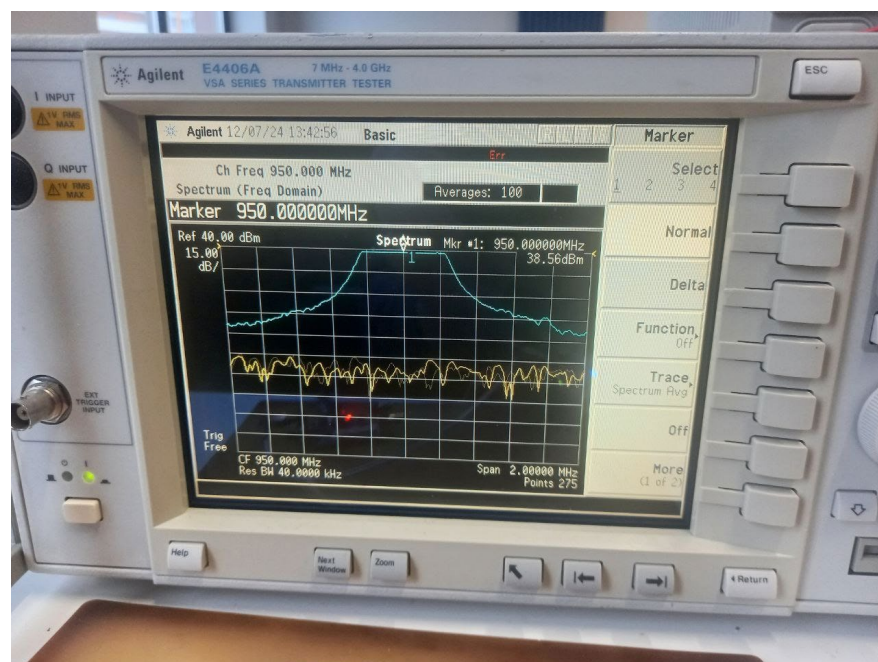


Рисунок 5.41 – Спектр потужності сигналу на частоті 950 МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Тестування на частоті 1000 МГц

Значення потужності сигналу на частоті 1000 МГц 19.87дБм з джерела сигналів (рисунок 5.42).

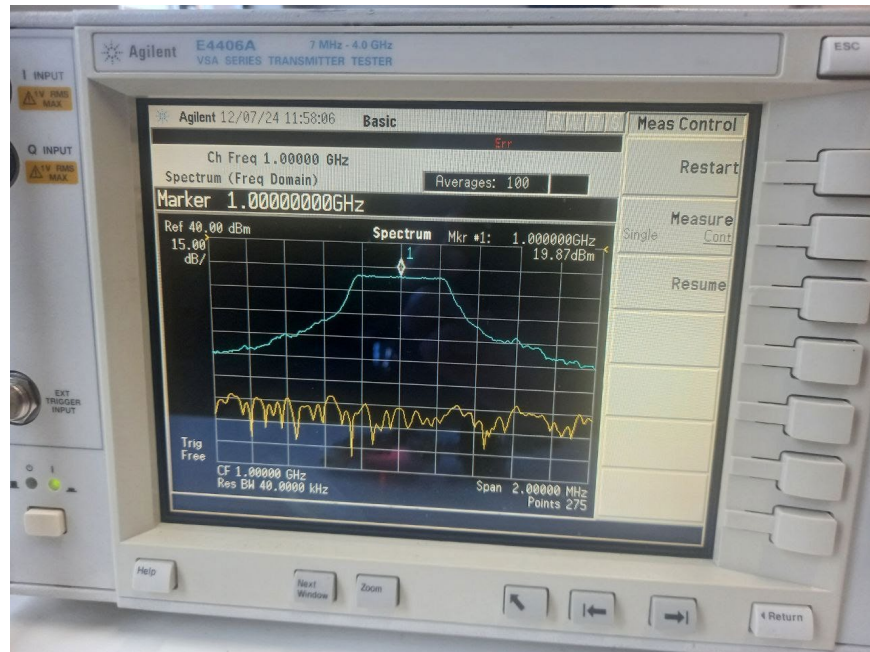


Рисунок 5.42 – Спектр потужності сигналу на частоті 1000 МГц від джерела сигналів.

Значення потужності сигналу на частоті 1000 МГц 37.81дБм з джерела сигналів із підсилювачем (рисунок 5.43).

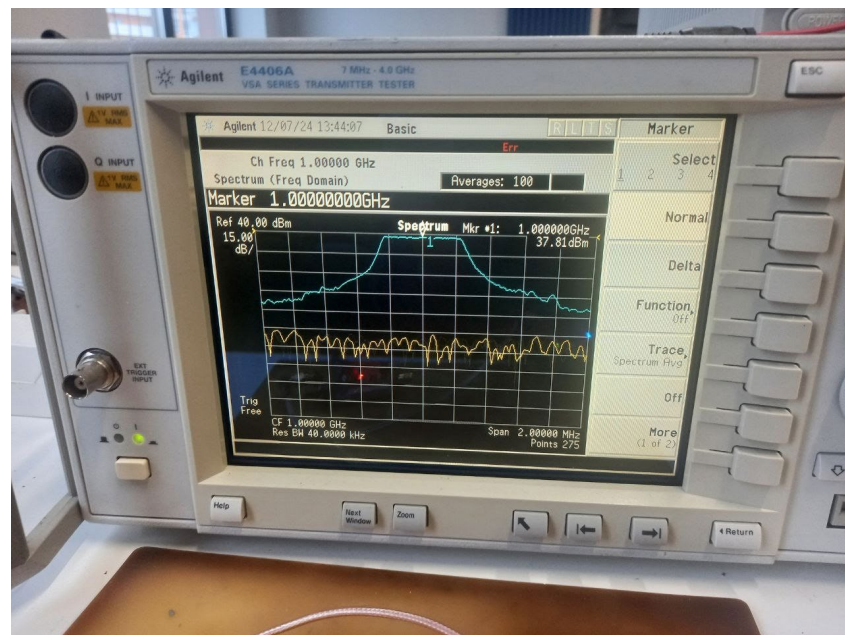


Рисунок 5.43 – Спектр потужності сигналу на частоті 1000МГц від джерела сигналів із підсилювачем.

Розрахунок коефіцієнта нелінійності

Побудуємо графік підсилення підсилювача (рисунок 5.44):

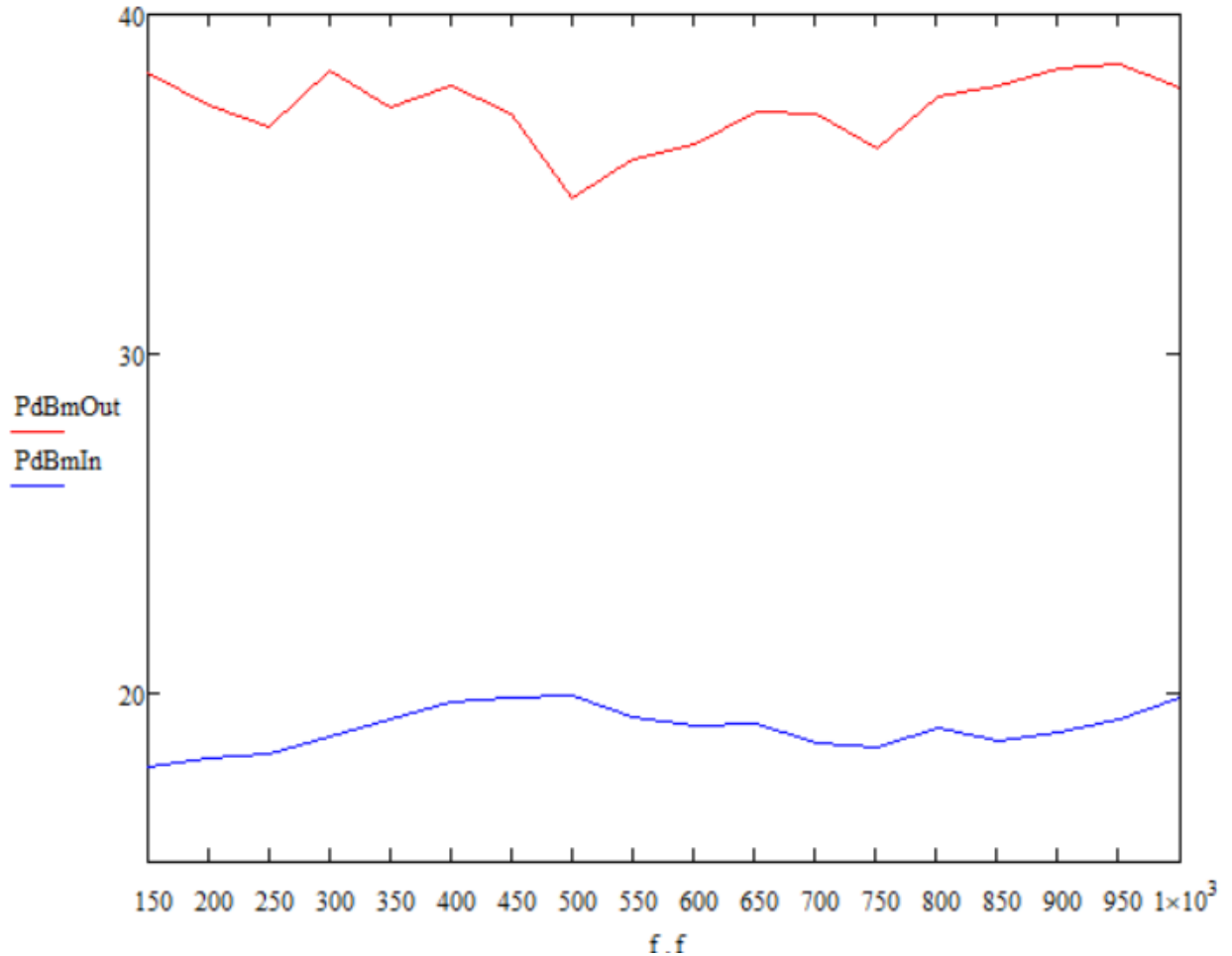


Рисунок 5.44 – графік залежності вхідної та вихідної потужності від частоти.

Розрахуємо коефіцієнт нелінійності застосувавши формулу (5.1):

$$KH = \frac{P_{\Delta\text{максимальне}}}{P_{\text{середнє}}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

Де:

$P_{\Delta\text{максимальне}}$ - максимальне відхилення вихідної потужності від середнього значення, дБм; $P_{\text{середнє}}$ - середнє значення вихідної потужності, дБм.

$$P_{\text{середнє}} = \frac{\sum_1^N P_{\text{вихідна}_n}}{N} = \frac{673.99}{18} = 37.44 \text{ дБм}$$

При частоті 500 МГц відхилення максимальне і становить $P_{\Delta\text{максимальне}} = |34.55 - 37.44| = 2.89 \text{ дБм}$.

Розрахуємо коефіцієнт нелінійності:

$$KH = \frac{2.89}{37.44} \cdot 100\% = 7.72\%$$

Коефіцієнт нелінійності підсилювача становить 7.72%, що вказує на невеликі відхилення вихідної потужності від середнього значення в діапазоні

частот 150 МГц – 1 ГГц. Це підтверджує стабільність роботи підсилювача в заданих умовах.

Розрахунок коефіцієнта підсилення

Побудуємо графік коефіцієнта підсилення (рисунок 5.45)

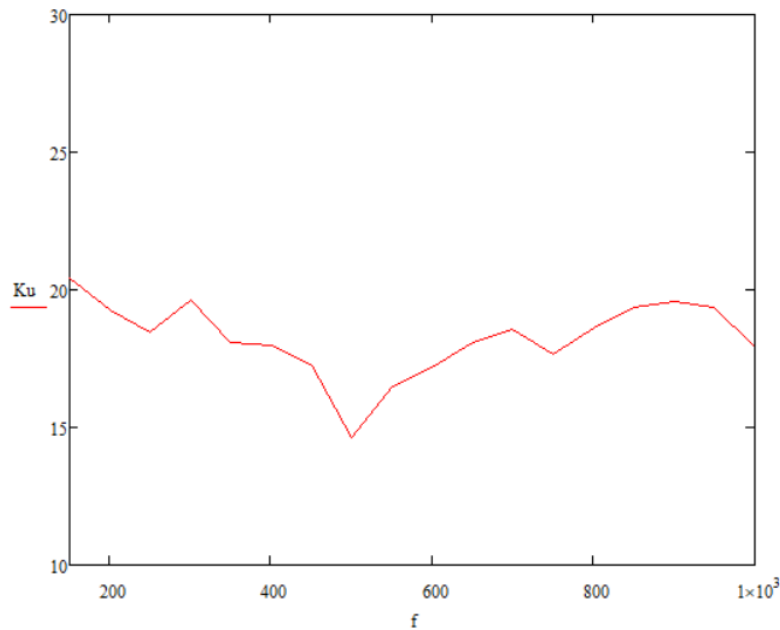


Рисунок 5.45 – графік коефіцієнта підсилення

Розрахуємо коефіцієнт підсилення застосувавши формулу (5.2)

$$K_U = P_{вих} - P_{вх} \quad (5.2)$$

Де:

$P_{вих}$ - потужність вихідного сигналу; $P_{вх}$ - потужність вхідного сигналу

Підсилення на частоті 150 МГц:

$$K_U = 38.26 - 17.83 = 20.43 \text{ дБ}$$

Підсилення на частоті 200 МГц:

$$K_U = 37.35 - 18.07 = 19.28 \text{ дБ}$$

Підсилення на частоті 250 МГц:

$$K_U = 36.66 - 18.18 = 18.48 \text{ дБ}$$

Підсилення на частоті 300 МГц:

$$K_U = 38.36 - 18.73 = 19.63 \text{ дБ}$$

Підсилення на частоті 350 МГц:

$$K_U = 37.27 - 19.18 = 18.09 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 400 МГц:

$$K_U = 37.87 - 19.69 = 18.18 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 450 МГц:

$$K_U = 37.04 - 19.82 = 17.22 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 500 МГц:

$$K_U = 34.55 - 19.93 = 14.62 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 550 МГц:

$$K_U = 35.73 - 19.26 = 16.47 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 600 МГц:

$$K_U = 36.18 - 19.00 = 17.18 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 650 МГц:

$$K_U = 37.14 - 19.06 = 18.08 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 700 МГц:

$$K_U = 37.07 - 18.53 = 18.54 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 750 МГц:

$$K_U = 36.05 - 18.40 = 17.65 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 800 МГц:

$$K_U = 37.55 - 18.94 = 18.61 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 850 МГц:

$$K_U = 37.92 - 18.54 = 19.38 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 900 МГц:

$$K_U = 38.38 - 18.83 = 19.55 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 950 МГц:

$$K_U = 38.38 - 18.83 = 19.55 \text{ dB}$$

Підсилення на частоті 1000 МГц:

$$K_U = 37.81 - 19.87 = 17.94 \text{ dB}$$

Коефіцієнт підсилення в середньому становить близько 18.41 дБ, з максимальним значенням 20.43 дБ на частоті 150 МГц та мінімальним 14.62 дБ на частоті 500 МГц.

Висновок

У процесі виконання роботи було розроблено субгігагерцовий підсилювач потужності, який демонструє стабільне підсилення сигналів у частотному діапазоні 150 МГц – 1 ГГц. Проведено аналіз технічного завдання, вибір компонентної бази, проєктування друкованої плати за стандартами HDI та тестування пристрою.

Результати тестування підтвердили відповідність пристрою технічним вимогам. Середній коефіцієнт підсилення сигналу склав 19.55 дБ, з максимальним значенням 20.43 дБ на частоті 150 МГц та мінімальним 14.62 дБ на частоті 500 МГц. Це свідчить про ефективну роботу підсилювача в усьому діапазоні частот. Максимальна вихідна потужність досягала 38.56 дБм (7.18 Вт) на частоті 950 МГц. Коефіцієнт нелінійності у всьому частотному діапазоні становив 7.72%, що свідчить про високу стабільність вихідного сигналу. Спектральні вимірювання показали низький рівень спотворень і високий ступінь придушення гармонік, що підтверджує якість підсилення.

Друкована плата виготовлена з діелектрика TU-872 із фінішним покриттям імерсійним золотом (INEG), що забезпечило низькі втрати сигналу та стабільність у широкому частотному діапазоні. Многошарова структура з опорними заземлювальними шарами дозволила досягти узгодження хвильового опору на рівні 50 Ом, що критично для високочастотних сигналів.

Таким чином, розроблений підсилювач демонструє високу лінійність, енергоефективність і стійкість до зовнішніх впливів. Пристрій можна ефективно використовувати в телекомунікаціях, радіолокації, супутникових системах і IoT. Він має потенціал для подальшого вдосконалення, адаптації під специфічні потреби та інтеграції в широкий спектр високотехнологічних рішень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. IQRF URL:
<https://en.wikipedia.org/wiki/IQRF>
2. Dragino. LG01-P Single Channel LoRa IoT Gateway. URL:
https://www.dragino.com/downloads/downloads/datasheet/EN/Datasheet_LG01.pdf.
3. Milesight. UG65 Indoor LoRaWAN Gateway. URL:
<https://www.milesight-iot.com/lorawan-gateway/ug65/>.
4. Kerlink. iFemtoCell Evolution Indoor LoRaWAN Gateway. URL:
<https://www.kerlink.com/product/wirnet-ifemtocell/>.
5. LM2611BMFX Cuk Switching Regulator. URL:
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2611.pdf?HQS=dis-dk-null-digikeymode-dsf-pf-null-ww&ts=1733762378694&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fgeneral%252Fdocs%252Fsuppproductinfo.tsp%253FdistId%253D10%2526gotoUrl%253Dhttps%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fli%252Fgpn%252Flm2611.
6. High-Speed Interface Layout Guidelines. URL:
https://www.ti.com/lit/an/spraar7j/spraar7j.pdf?ts=1733748748019&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.bing.com%252F.
7. PCB Design Guidelines For Reduced EMI. URL:
<https://www.ti.com/lit/an/szza009/szza009.pdf>
8. Practical PCB Design Guidelines for High-Frequency Circuits. URL:
<https://www.protoexpress.com/kb/designing-high-frequency-pcbs/>
9. RF Design Guidelines: PCB Layout and Circuit Optimization. URL:
https://microchip.ua/simcom/Antenna/rf_design_guidelines_semtech.pdf
10. PCBWay PCB Capabilities. URL:
<https://www.pcbway.com/capabilities.html>
11. dBm – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/DBm>

12. Трасування провідників контролем хвильового опору | Altium Designer 18.1 Інструкція користувача | Документація. PCB Design Software & Tools | Altium. URL: <https://www.altium.com/ru/documentation/altium-designer/interactively-routing-controlled-impedance-pcb?version=18.1>
13. IPC-2221 Calculator for PCB Trace Current and Heating. Altium. URL: <https://resources.altium.com/p/ipc-2221-calculator-pcb-trace-current-and-heating>
14. Optimizing Your High Frequency PCB Design Layout. URL: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2022-optimizing-your-high-frequency-pcb-design-layout>
15. A Practical Guide to High-Speed Printed-Circuit-Board Layout. URL: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/high-speed-printed-circuit-board-layout.html>
16. High-Speed PCB Design Guide. URL: <https://www.protoexpress.com/pcb-design-guides/high-speed-pcb/>

ДОДАТОК А

Технічне завдання

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА
МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ
«Підсилювач потужності в субгігагерцовому діапазоні»

Київ 2024

Назва і підстава до виконання

Назва магістерської дисертації «Підсилювач потужності в субгігагерцовому діапазоні».

Підставою для виконання є завдання, видана кафедрою радіотехнічних систем від «__» _____ 2024р.

ВИКОНАВЕЦЬ

Виконавець — студент групи РС-31МП Новицький Ярослав Артемович.

МЕТА ВИКОНАННЯ ДП ТА ПРИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКЦІЇ

Метою виконання даної роботи є розробка портативного пристрою для підсилення сигналів субгігерцового діапазону.

ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

- Забезпечити підсилення сигналів у всьому діапазоні частот.
- Забезпечити можливість програмування даних.
- Напруга живлення від 5В до 13В.
- Використовувати сучасну елементну базу.

Вимоги життєздатності та стійкості до зовнішніх впливів і чинників

Портативний пристрій призначений для експлуатації на відкритому повітрі, а також у неопалюваних надземних та підземних спорудах згідно ДСТУ 16019-2001 Н7.

Вимоги до конструкції

- Плата пристрою повина мати 4 отвори.
- Площа плати повинна мати мінімальну площу

Вимоги до консервації, пакування і маркування

Вимоги до консервації, пакування і маркування не пред'являються.

Спеціальні вимоги

Використання доступних у продажу та якісних компонентів.

Техніко-економічні вимоги

Вимоги не пред'являються.

Вимоги до сировини та матеріалів

Вимоги до сировини та матеріалів не пред'являються.

Вимоги до розроблюваної документації

Оформлення документації згідно ДСТУ 3008:2015.

Склад конструкторської документації:

1. Текстова документація (пояснювальна записка, перелік елементів, специфікація на електроний модуль, специфікація на пристрій, відомість дипломного проекту).
2. Графічна документація (схема електрична принципова, креслення друкової плати)
3. Додатки (ТЗ, ЕЗ, ПЕ, на електроний модуль)
4. Графічна частина: ЕЗ, Кресленик ДП.

Склад продукції

- Підсилювач потужності у субгігагерцовому діапазоні

ДОДАТОК Б
Специфікація на пристрій

ДОДАТОК В
Перелік елементів

Позн.	Найменування				Кіл.	Примітки		
	<u>Резистори</u>							
R10, R25, ...	10 кОм 1% 0,063W 0402 RC0402FR-0710KL -Yageo				5			
R2, R3	5,1 кОм 1% 0,063W 0402 RC0402FR-075K1L -Yageo				2			
R8	25.5 кОм 1% 0,063W 0402 RC0402FR-0725K5L -Yageo				1			
R13	47.5 кОм 1% 0,063W 0402 RC0402FR-0747K5L -Yageo				1			
R11, R12, R13	100 Ом 1% 0,063W 0402 RC0402FR-07100RL -Yageo				3			
R14, R16, R17, R22	22 Ом 1% 0,063W 0402 RC0402FR-0722RL -Yageo				4			
R15	0 Ом 1% 0,063W 0402 RC0402FR-070RL -Yageo				1			
R18, R23	11 кОм 1% 0,063W 0402 RC0402FR-0711KL -Yageo				2			
R19, R24	16 Ом 1% 0,063W 0402 RC0402FR-0716KL -Yageo				2			
R21, R26	270 Ом 1% 0,063W 0402 RC0402FR-07270RL -Yageo							
	<u>Конденсатори</u>				1			
C1, C2	22 мкФ 0805 GRM21BR61E226ME44L Murata Electronics				2			
C3, C4, ...	100 нФ 0402 GCM155R71H104KE02J Murata Electronics				43			
C5, C10, ...	10 мкФ 0805 GRM21BR61E106KA73K Murata Electronics				8			
C7, C14	1 мкФ 0402 CL05A105KO5NNNC Samsung Electro-Mechanics				2			
C15	100 нФ 0402 GRM155R71H104KE Murata Electronics				1			
					PC31МП.464416.001			
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпи с	Дата				
Розробив	Новицький				Підсилювач потужності в	Лім.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Мирончук						1	4
Реценз.						КПІ ім. Ігоря		
Н.Контр	Піддубний							

Затверд.	Мирончук			субгігагерцовому діапазоні Перелік елементів	Сікорського, РТФ
----------	----------	--	--	--	------------------

Позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
C25	100 нФ 0402 CC0402JRNPO9BN101 Yageo	1	
C30, C45, ...	1 нФ 0402 GJM1555C1H1R2BB01D Murata Electronics	3	
C29	1 нФ 0402 GJM1555C1H1R0BB01D Murata Electronics	1	
C31, C32, ...	4.7 мкФ 0402 C1005X5R1A475K050BC TDK Corporation	3	
C47, C79	820 нФ 0402 GRM1555C1H821JA01D Murata Electronics	2	
C49, C81	27 нФ 0402 CC0402JRNPO9BN270 Yageo	2	
C53, C85	18 нФ 0402 CC0402JRNPO9BN180 Yageo	2	
C55, C87	10 нФ 0402 GCM155R71H103KA55D Murata Electronics	2	
C57, C89	47 мкФ 0805 GRM21BR61A476ME15L Murata Electronics	2	
C59, C64, ...	330 нФ 0402 GRM1555C1H331JA01D Murata Electronics	4	
C60, C65, ...	10 нФ 0402 CL05C100DB5NNNC Samsung Electro-Mechanics	4	
	<u>Дороселі</u>		
L1	1.5 мкГн 0806 IHHP0806AZER1R5M01 Vishay Dale	1	
L2	15 нГн 0402 LQW15AN15NJ00D Murata Electronics	1	
L3	10 мкГн 0603 MLZ1608N100LTD25 TDK Corporation	1	
L4	4.7 нГн 0402 LQG15HS4N7S02D Murata Electronics	1	
L5	2.2 нГн 0402 LQG15HS2N2S02D Murata Electronics	1	

L6, L7	2.2 мкГн 0805 LQM21PN2R2MGHL Murata Electronics			2	
	<u>Феритові кільця</u>				
					PC31МП.464416.001
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Арк. 2

Позн.	Найменування	Кіл.	Примітки
<u>Діоди</u>			
D1	1N4148WT onsemi	1	D1
D2, D5 ...	MM5Z4V7ST5G onsemi		D2, D5 ...
D3	S1B-13-F Diodes Incorporated	1	D3
D4	B360A-13-F Diodes Incorporated		D4
<u>Транзистори</u>			
Q1, Q5	DMP2008UFG-7 Diodes Incorporated	2	Q1, Q5
Q2, Q4, ...	BSS138PW,115 onsemi	3	Q2, Q4, ...
<u>Роз'єми</u>			
J1, J2	0733910083 Molex	2	J1, J2
X1	XT30PW-M Amass	1	X1
X2	430450200 Molex	1	X2
X4	1734829-2 TE Connectivity AMP Connectors	1	X4
<u>Мікросхеми</u>			
U2	HMC1099PM5ETR Analog Devices Inc.	1	U2
U3	LM2611BMFX/NOPB Texas Instruments	1	U3
U4	TPS55340RTER Texas Instruments	1	U4
<u>Діоди</u>			
D1	1N4148WT onsemi	1	D1
D2, D5 ...	MM5Z4V7ST5G onsemi	3	D2, D5 ...

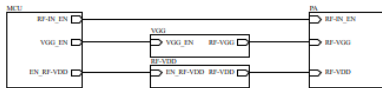
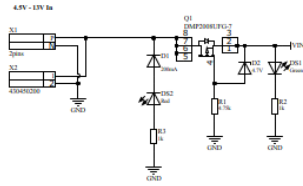
ДОДАТОК Г

Схема електрична принципова

РС31МП.464416.001

Лист застос.

Схема №

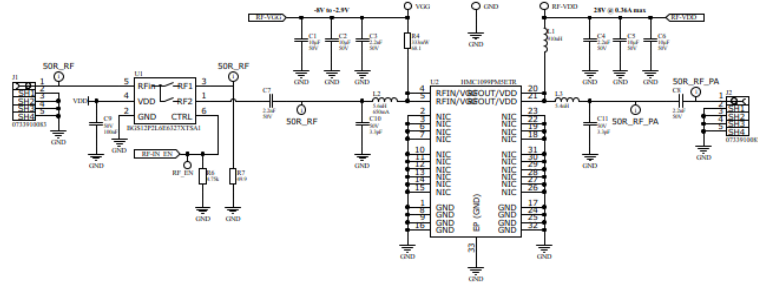


□□□□

						РС31МП.464416.001				
Зм.	Лист	№ док.	Підпис	Дата				Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.	Новицький	Я			Підсилювач потужності в субгігерцовому діапазоні Електрична принципова схема захисту по вхідному живленню					
Перев.	Мирончук	О.								
Т. контр.										
Н. контр.										
Затв.	Мирончук	О.								

Копіював:

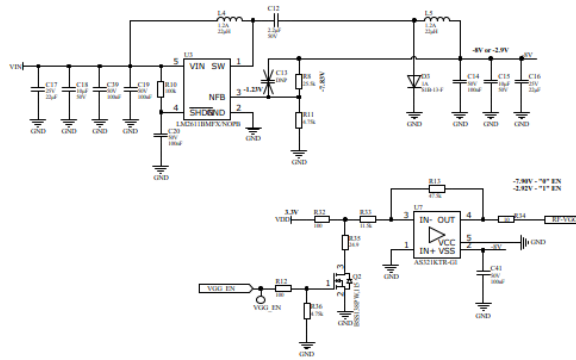
Формат А3



				PC31MP.464416.001		
Зм. Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Підсилювач потужності в субгігерцовому діапазоні Електрична принципова схема високошвидкісного підсилювача потужності		
Розроб.	Новицький Я.					
Перев.	Мирончук О.					
Т. контр.						
Н. контр.						
Затв.	Мирончук О.			Лист 2	Листів 5	

Копіював:

Формат А3

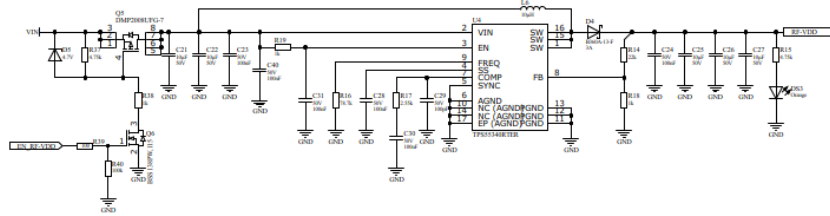


				PC31MP.464416.001			
Зм.	Лист	№ док.	Підпис	Дата	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.	Новицький Я						
Перев.	Мирончук О						
Т. контр.					Лист 3	Листів 5	
Н. контр.							
Затв.	Мирончук О						

Копіював:

Формат А3

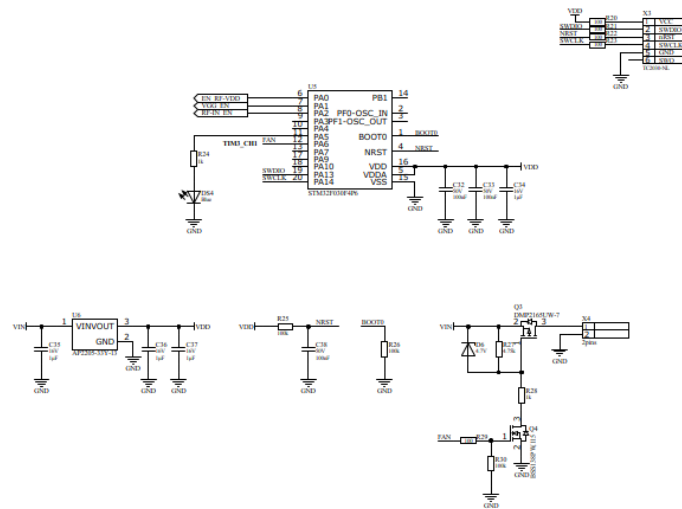
Підсилювач потужності в субгігерцовому діапазоні
Електрична принципова схема створення від'ємного сигналу управління для підсилювання



				PC31MП.464416.001			
Эк. лист	№ докум.	Подпис	Дата	Підсилювач потужності в субгігерцовому діапазоні Електрична схема перетворювача напруги для живлення підсилювача	Лит.	Маса	Масштаб
Розроб.	Новицький Я.						
Перев.	Мирончук О.						
Т. контр.					Лист 4	Листів 5	
Н. контр.							
Затв.	Мирончук О.						

Копіював:

Формат А3



				PC31MP.464416.001		
ЭМ. Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Підсилювач потужності в субгігерцовому діапазоні Електрична схема системи управління		
Розроб.	Новицький Я.					
Т. контр.	Мирончук О.					
Н. контр.						
Затв.	Мирончук О.			Лит.	Маса	Масштаб
				Лист 5	Листів 5	

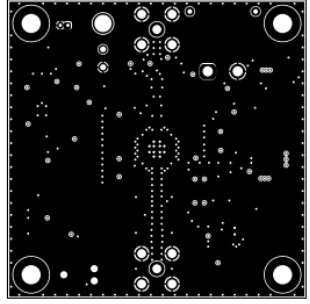
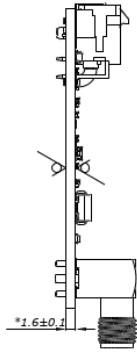
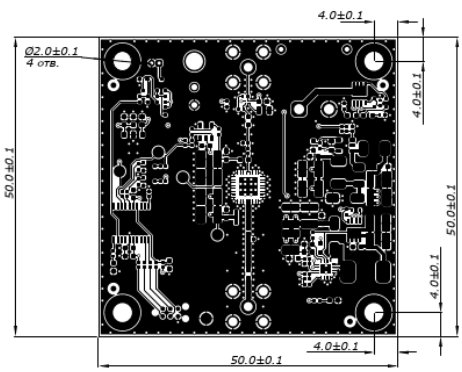
Копіював:

Формат А3

ДОДАТОК Д
Друкована плата

PC31MP.464416.001

√Ra 6.3



1. *Розмір для довідок
2. Клас точності 2 згідно із IPC 6012
3. Координати отворів друкованої плати на машинному носії IR-UWB.NCD
 Топологія провідників верхнього шару друкованої плати на машинному носії
 IR-UWB_Copper_Signal_Top
 Топологія провідників верхнього шару друкованої плати на машинному носії
 IR-UWB_Copper_Signal_Layer1
 Топологія провідників верхнього шару друкованої плати на машинному носії
 IR-UWB_Copper_Signal_Layer2
 Топологія провідників другого шару друкованої плати на машинному носії
 IR-UWB_Copper_Signal_Bot
 Топологія захисної паяльної маски верхнього шару друкованої плати на машинному носії
 IR-UWB_Soldermask_Top
 Топологія захисної паяльної маски нижнього шару друкованої плати на машинному носії
 IR-UWB_Soldermask_Bot
 Шар шовкографії верхнього шару друкованої плати на машинному носії IR-UWB_Legend_Top
4. Інші технічні вимоги за ОСТ4 ГО 010,070,014

				PC31MP.464416.001				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Підсилювач потужності в субгігерцовому діапазоні	Лист	Маса	Масштаб
Розроб.					Друкована плата			1:1
Перевір.						Аркуш	Аркушів	1
Т. контр.					TU-762 1oz/1oz 1.6			
Н. контр.								
Затв.								

Копіював

Формат А3

Листів заповнення / Додаток № / Листів у впаковці / Стор. № в серії / Стор. № в серії / Листів у впаковці / Листів у впаковці / Листів у впаковці