

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

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоінженерії

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЛІТВІНЦЕВ

« 12 » 06 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньою програмою «Інформаційна та комунаційна радіоінженерія»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «Підсилювач потужності діапазону частот 700-1050 МГц»

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи РС-21

Степанищенко Євген Вадимович

Керівник:

Козачук Максим Андрійович

Рецензент:

Романенко Тарас Володимирович

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіоінженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ЛІТВІНЦЕВ

« 20 » 04 _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Степанищенку Євгену Вадимовичу

1. Тема проєкту «Підсилювач потужності діапазону 700 – 1050 МГц»,
керівник проєкту Козачук Максим Андрійович, к.т.н., ст. викл., затверджені
наказом по університету від «25» травня 2026 р. №1989-с
2. Термін подання студентом проєкту 31.05.2026
3. Вихідні дані до проєкту: робочий діапазон частот 700-1050 МГц, вихідна потужність не менше 100 Вт, ККД не гірше 50%, робота при КСХН>2.
4. Зміст пояснювальної записки ВСТУП, ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ, АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ, РОЗРОБКА

ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ ДІАПАЗОНУ 700–1050 МГц,
ВИСНОВКИ.

5. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

6. Дата видачі завдання 27 квітня 2026

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд літератури	27.04 – 04.05	Виконано
2	Огляд елементної бази	04.05 – 06.05	Виконано
3	Ознайомлення із середовищем AWR, KiCad	06.05 – 11.05	Виконано
4	Дослідження аналогів	11.05 – 13.05	Виконано
5	Побудова моделей, створення креслень	13.05 – 18.05	Виконано
6	Налагодження дослідного зразка, вимірювання параметрів	18.05 – 25.05	Виконано
7	Написання та оформлення пояснювальної записки дипломного проєкту	25.05 – 29.05	Виконано
8	Оформлення висновків	30.05 – 31.05	Виконано

Студент



Євген СТЕПАНИЩЕНКО

Керівник



Максим КОЗАЧУК

АНОТАЦІЯ

Темою даного дипломного проєкту є «Підсилювач потужності діапазону 700 – 1050 МГц».

Обсяг дипломного проєкту — 59 сторінок, 21 рисунок, 3 таблиці, 8 джерел за переліком посилань.

Метою дипломного проєкту є розробка широкосмугового підсилювача потужності для систем РЕБ, який забезпечує вихідну потужність понад 100 Вт у діапазоні частот 700–1050 МГц. У роботі проведено аналіз сучасних аналогів широкосмугових підсилювачів потужності, розглянуто особливості побудови ВЧ підсилювачів для систем РЕБ, обґрунтовано вибір елементної бази та виконано розробку вхідного і вихідного кіл підсилювача.

У роботі виконано моделювання широкосмугових узгоджувальних кіл у програмному середовищі AWR Design Environment та розроблено електричні принципові схеми і друковані плати у програмному забезпеченні KiCad. Проведено виготовлення та налагодження підсилювача, а також експериментальні вимірювання його параметрів.

Розроблений підсилювач забезпечує вихідну потужність понад 100 Вт у всьому діапазоні частот 700–1050 МГц при коефіцієнті корисної дії до 63 %, що дозволяє використовувати його у складі широкосмугових передавачів систем радіоелектронної боротьби.

Ключові слова: широкосмуговий підсилювач потужності, радіоелектронна боротьба, вихідна потужність 100 Вт, робочий діапазон 700–1050 МГц.

ANNOTATION

The topic of this diploma project is “Power Amplifier for the 700–1050 MHz Frequency Range”.

The diploma project consists of 59 pages, 21 figures, 3 tables, and 8 references.

The purpose of the diploma project is to develop a broadband power amplifier for electronic warfare systems capable of providing an output power of more than 100 W within the 700–1050 MHz frequency range. The project includes an analysis of modern broadband power amplifier analogues, consideration of the design features of RF amplifiers for electronic warfare systems, justification of the selected component base, and development of the input and output matching circuits of the amplifier.

The work includes simulation of broadband matching circuits in the AWR Design Environment software and development of electrical schematics and printed circuit boards in the KiCad software. The amplifier was manufactured, tuned, and experimentally tested to evaluate its performance parameters.

The developed amplifier provides an output power of more than 100 W across the entire 700–1050 MHz frequency range with an efficiency of up to 63 %, which makes it suitable for use in broadband transmitters of electronic warfare systems.

Keywords: broadband power amplifier, electronic warfare, 100 W output power, operating frequency range 700–1050 MHz.

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Підсилювач потужності діапазону 700 – 1050
МГц»

Київ – 2026 року

Зміст

1	ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ .	5
1.1.	Основні характеристики та класи високочастотних підсилювачів потужності	5
	Клас А.....	7
	Клас В.....	9
	Клас С.....	11
	Клас АВ.....	11
1.2.	Сучасна елементна база підсилювачів дециметрового діапазону	13
1.3.	Особливості побудови широкосмугових підсилювачів для систем РЕБ	17
	Висновки до розділу 1	19
2	АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ.....	21
2.1.	RWP15080-10.....	21
2.2.	RFLUPA0727GA.....	24
2.3.	700-1000 МГц GaN-Lora RF Power Amplifier.....	26
	Висновки до розділу 2	29
3	РОЗРОБКА ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ ДІАПАЗОНУ 700–1050 МГц	31
3.1.	Розробка схеми та плати вхідного кола.....	36
3.2.	Розробка схеми та плати вихідного кола.....	46
3.3.	Налагодження та кінцеві параметри підсилювача	48
	Висновки до розділу 3	55
	ВИСНОВКИ.....	57
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

					PI21.468732.001 ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.					ПІДСИЛЮВАЧ ПОТУЖНОСТІ ДІАПАЗОНУ 700-1050 МГц			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.									1	59
								НТУУ “КПІ”, РТФ		
Н. Контр.										
Затверд.										

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЧХ — амплітудно-частотна характеристика

ВЧ — високі частоти

ГКН — генератор, керований напругою

ККД — коефіцієнт корисної дії

КП — коефіцієнт підсилення

КСХН — коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі

НТК — негативний температурний коефіцієнт

РЕБ — радіоелектронна боротьба

ШІМ — широтно-імпульсна модуляція

					РІ21.468732.001 ПЗ	Арк.
						1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний розвиток телекомунікаційних систем, радіолокації, бездротових мереж передачі даних, систем спеціального зв'язку та радіоелектронних комплексів потребує використання високоефективних радіочастотних підсилювачів потужності, здатних забезпечувати стабільну роботу в широкому діапазоні частот та при значних рівнях вихідної потужності. Особливого значення набувають підсилювачі потужності дециметрового діапазону частот 700–1050 МГц, які широко застосовуються у системах мобільного зв'язку, цифрового телебачення, радіорелейних лініях, системах управління безпілотними літальними апаратами, а також у засобах спеціального та військового призначення.

В умовах сучасного розвитку засобів радіоелектронної боротьби особливої актуальності набуває створення широкосмугових передавальних пристроїв, здатних ефективно формувати та підсилювати сигнали завад у широкому частотному діапазоні. Одним із ключових елементів таких систем є підсилювач потужності, який забезпечує необхідний рівень вихідного сигналу для передавача РЕБ. Передбачається, що розроблений підсилювач буде використовуватись у складі передавача радіоелектронної боротьби, який керується за допомогою комп'ютера та забезпечує можливість вибору робочої смуги шириною 50–100 МГц у межах заданого діапазону частот 700–1050 МГц. Це дозволяє адаптувати роботу системи до конкретних умов застосування та підвищує ефективність придушення радіоканалів.

Забезпечення вихідної потужності на рівні 100 Вт у діапазоні 700–1050 МГц супроводжується рядом технічних проблем, серед яких важливими є теплові режими роботи активних елементів, забезпечення високого значення

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коефіцієнта корисної дії підсилювача, узгодження каскадів у широкій смузі частот.

На сьогодні існує значна кількість схемотехнічних рішень підсилювачів потужності, побудованих на основі польових транзисторів, однак більшість із них орієнтовані або на вузькосмуговий режим роботи, або на менші значення вихідної потужності. Крім того, значна частина існуючих конструкцій характеризується недостатнім рівнем охолодження при роботі.

Таким чином, актуальність теми дипломного проєкту полягає у необхідності розробки широкосмугового підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц з вихідною потужністю 100 Вт, який забезпечуватиме високі енергетичні та експлуатаційні характеристики при стабільній роботі у заданому частотному діапазоні та можливість інтеграції до сучасних систем радіoeлектронної боротьби.

Метою роботи є встановлення оптимальних схемотехнічних та конструктивних рішень для створення підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц з вихідною потужністю 100 Вт для використання у складі передавача радіoeлектронної боротьби з комп'ютерним керуванням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити особливості побудови сучасних височастотних підсилювачів потужності дециметрового діапазону.
2. Вивчити характеристики сучасних активних елементів, придатних для роботи у діапазоні 700–1050 МГц при вихідній потужності 100 Вт.
3. Розробити схему електричну принципову підсилювача потужності для передавача РЕБ.
4. Розробити складальне креслення підсилювача потужності.
5. Розробити рекомендації щодо практичної реалізації та забезпечення теплової стабільності підсилювача.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Об'єктом дослідження є процес підсилення високочастотних сигналів у широкосмугових радіотехнічних системах дециметрового діапазону.

Предметом дослідження є схмотехнічні та конструктивні рішення підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц з вихідною потужністю 100 Вт для систем радіоелектронної боротьби.

Для досягнення поставленої мети у роботі використано методи теорії електричних кіл та радіотехнічних систем для аналізу режимів роботи підсилювача; методи математичного моделювання для визначення частотних та енергетичних характеристик пристрою; методи комп'ютерного схмотехнічного моделювання для дослідження параметрів підсилювача та оцінки його основних параметрів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленого підсилювача потужності у складі передавачів радіоелектронної боротьби, систем радіозв'язку та спеціалізованих радіотехнічних комплексів. Запропоновані схмотехнічні рішення можуть бути використані при створенні сучасних широкосмугових передавальних пристроїв дециметрового діапазону з підвищеною енергетичною ефективністю, стабільністю роботи та можливістю програмного керування робочими частотними смугами.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ

Підсилювачі потужності є одним із ключових елементів сучасних радіотехнічних систем, оскільки саме вони забезпечують формування необхідного рівня вихідного сигналу для ефективної роботи передавальних пристроїв. Особливо актуальним є використання широкосмугових високочастотних підсилювачів у системах радіоелектронної боротьби, де важливими вимогами є висока вихідна потужність, стабільність роботи та можливість функціонування у широкому діапазоні частот.

При розробці підсилювачів потужності дециметрового діапазону виникає необхідність врахування ряду факторів, зокрема вибору активних елементів, забезпечення ефективного узгодження каскадів, теплової стабільності та досягнення необхідного коефіцієнта корисної дії. У даному розділі розглянуто основні теоретичні аспекти побудови високочастотних підсилювачів потужності.

1.1. Основні характеристики та класи високочастотних підсилювачів потужності

Основними параметрами високочастотного підсилювача потужності є вихідна потужність, коефіцієнт підсилення, коефіцієнт корисної дії, робочий діапазон частот, коефіцієнт стоячої хвилі за напругою, тепла стабільність. Саме ці параметри визначають ефективність роботи підсилювача, його енергетичні характеристики, стабільність роботи у широкому діапазоні частот та надійність при роботі у режимах високої потужності. Для широкосмугових підсилювачів, що використовуються у системах

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

радіоелектронної боротьби, особливе значення мають високий ККД, стійкість до неузгодженого навантаження та здатність забезпечувати стабільні параметри у широкій смузі частот.

Режим роботи підсилювача визначає особливості його функціонування, енергетичну ефективність та характер проходження сигналу. Залежно від величини зміщення на транзисторі розрізняють декілька режимів роботи. Найбільшого поширення у високочастотній техніці набули режими А, В, АВ та С. Окрему групу складають імпульсні режими роботи, зокрема D, Е, F та Т, у яких використовуються методи комутації та ШІМ для підвищення ефективності перетворення енергії. Базові підходи до побудови та функціонування підсилювачів потужності наведені у [1].

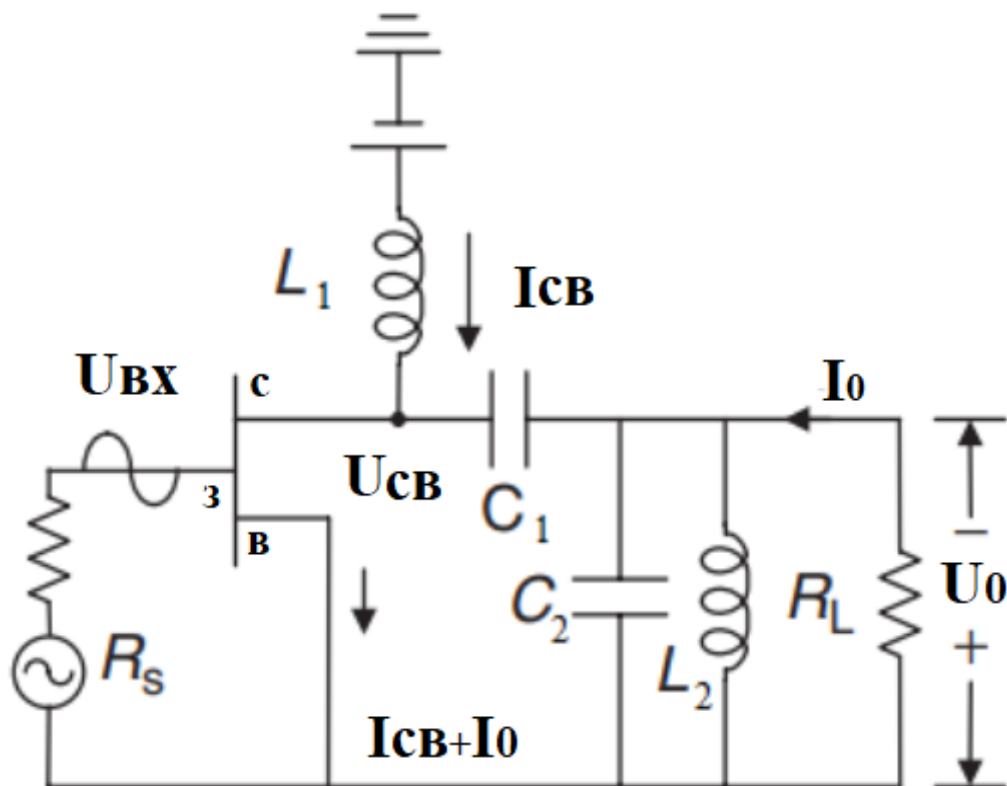


Рис. 1.1 — Схема підсилювача потужності

Клас А

Для режиму роботи класу А характерним є те, що транзистор перебуває у відкритому стані протягом повного періоду зміни вхідного сигналу. Робочий режим транзистора вибирається таким чином, щоб забезпечити симетричне відхилення струму та напруги відносно точки спокою, що дозволяє отримати мінімальні нелінійні спотворення та максимально точне відтворення форми сигналу. Підсилювач класу А описано в [2].

Особливістю такого типу підсилення є висока лінійність, оскільки форма вихідного сигналу практично повторює форму сигналу на вході, змінюється лише його амплітуда. Завдяки цьому підсилювачі класу А широко застосовуються у пристроях, де важливе якісне підсилення без значних спектральних спотворень. Для забезпечення ефективної передачі енергії до навантаження використовуються узгоджувальні кола, які дозволяють отримати необхідний рівень вихідної потужності та зменшити втрати.

На відміну від малопотужних каскадів підсилення, у підсилювачах потужності особливу увагу приділяють режимам роботи транзистора, тепловиділенню та ефективності роботи з навантаженням. При цьому активний елемент постійно споживає струм навіть за відсутності вхідного сигналу, що є характерною особливістю класу А та призводить до низького ККД.

Струм і напругу, можна виразити формулами 1.1, 1.2.

$$v_c(\theta) = V_{ce} - V_0 \sin \theta \quad 1.1$$

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де, $v_c(\theta)$ — залежність напруги стоку від кута відсічки;

V_{cv} — термін для постійної напруги;

V_0 — пікові значення напруги.

$$i_c(\theta) = I_{cv} - I_0 \sin \theta \quad 1.2$$

де, $i_c(\theta)$ — залежність струму стоку від кута відсічки;

i_{cv} — термін для постійного струму;

I_0 — пікові значення струму.

V_0 та i_0 між собою пов'язані співвідношенням 1.3. Постійна складова напруги та струму відсікається за допомогою конденсатора С1, зображеного на рис. 1.1.

$$V_0 = I_0 \cdot R_L \quad 1.3$$

де, V_0 — пікове значення напруги;

I_0 — пікове значення струму;

R_L — опір навантаження.

Максимальна вихідна потужність визначається за формулою 1.4.

$$P = \frac{V_{cv} \cdot I_{\max}}{4} \quad 1.4$$

де, P — максимальна вихідна потужність;

V_{cv} — напруга стік - витік;

$I_{\max}$ — максимальний струм.

Потужність постійного струму можна розрахувати за формулою 1.5.

$$P_{DC} = \frac{V_{cv} \cdot I_{\max}}{2} \quad 1.5$$

де, P_{DC} — максимальна потужність постійного струму;

V_{cv} — напруга стік - витік;

$I_{\max}$ — максимальний струм.

З формул 1.4 і 1.5 можна розрахувати максимальну ефективність, як показано в формулі 1.6.

$$\eta = \frac{P}{P_{DC}} = 0.5 \quad 1.6$$

де, η — ефективність;

P — максимальна вихідна потужність;

P_{DC} — максимальна потужність постійного струму.

Таким чином, теоретичне граничне значення ККД підсилювача класу А становить близько 50 %. Досягнення такого значення можливе лише за ідеальних умов роботи, коли відсутні паразитні параметри транзистора, втрати в узгоджувальних колах та використовується виключно активний характер навантаження.

Клас В

У режимі роботи класу В активний елемент працює поблизу порогового режиму провідності, унаслідок чого проходження струму відбувається лише протягом половини періоду вхідного коливання. Загальна схема підсилювача потужності зображена на рис. 1.1, від підсилювача класу А відрізняється лише значення I_0 . Такий принцип роботи забезпечує суттєве підвищення енергетичної ефективності підсилювального каскаду, однак супроводжується зростанням нелінійних спотворень вихідного сигналу. Основні особливості підсилювача класу В розглянуті у джерелі [3].

Струм і напругу, можна виразити формулами 1.7, 1.8.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$v_c(\theta) = V_{cv} - V_0 \sin \theta \quad 1.7$$

де, $v_c(\theta)$ — залежність напруги стоку від кута відсічки;

V_{cv} — термін для постійної напруги;

V_0 — пікові значення напруги.

$$\begin{aligned} i_c(\theta) &= I_0 \sin \theta & 0 \leq \theta \leq \pi & \quad 1.8 \\ &= 0 & \pi \leq \theta \leq 2\pi \end{aligned}$$

де, $i_c(\theta)$ — залежність струму стоку від кута відсічки;

θ — кут відсічки;

I_0 — пікові значення струму.

Середня вихідна потужність визначається за формулою 1.9.

$$P = \frac{1}{4} V_{cv} \cdot I_{\max}$$

1.9

де, P — максимальна вихідна потужність;

V_{cv} — напруга стік - витік;

$I_{\max}$ — максимальний струм.

Потужність споживання можна розрахувати за формулою 1.10.

$$P_{DC} = \frac{V_{cv} \cdot I_{\max}}{\pi}$$

1.10

де, P_{DC} — максимальна потужність постійного струму;

V_{cv} — напруга стік - витік;

$I_{\max}$ — максимальний струм.

З формул 1.9 і 1.10 можна розрахувати максимальну ефективність, як показано в формулі 1.11.

$$\eta = \frac{P}{P_{DC}} = \frac{\pi}{4} = 0.785$$

1.11

де, η — ефективність;

P — максимальна вихідна потужність;

P_{DC} — максимальна потужність постійного струму.

Отже, максимальна ефективність підсилювача класу В може бути 78.5% за ідеальних умов. При цьому енергетична ефективність такого режиму роботи суттєво перевищує показники підсилювачів класу А, однак це досягається за рахунок погіршення лінійності підсилення сигналу.

Клас С

Для режиму роботи підсилювача типу С характерним є зміщення режиму активного елемента у область, за якої провідність виникає лише протягом короткого інтервалу вхідного сигналу[4]. Такий принцип роботи дозволяє суттєво підвищити енергетичну ефективність каскаду, значення якої у деяких випадках може досягати близько 94 %. Разом із тим через малий кут провідності виникають значні нелінійні спотворення вихідного сигналу. Активний елемент перебуває у відкритому стані менше половини періоду коливання, тобто кут провідності є меншим за 180° .

Клас АВ

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

У діапазонах високих та надвисоких частот отримання значного підсилення сигналу є складним завданням навіть при використанні режиму А, тому будь-яке додаткове зниження коефіцієнта передачі суттєво впливає на ефективність роботи підсилювального каскаду. Саме з цієї причини у практичних конструкціях найчастіше застосовується режим АВ, який займає проміжне положення між режимами А та В. Такий підхід дозволяє одночасно обмежити тепловиділення активного елемента та уникнути значного зменшення підсилення, характерного для режиму В. Зменшення струму спокою забезпечує нижче розсіювання потужності, при цьому транзистор залишається частково відкритим протягом більшої частини періоду сигналу. Для режиму АВ характерний кут провідності в межах від 180° до 360° , тобто активний елемент припиняє провідність лише на окремих ділянках синусоїдального сигналу.

Окремі дослідження наведені в [5] показують, що при певних режимах зміщення та рівнях вхідної потужності підсилювач класу АВ може забезпечувати лінійність, співставну або в окремих випадках вищу, ніж підсилювач класу А. Це пояснюється тим, що при правильно вибраному зміщенні зменшується вплив нелінійних процесів, пов'язаних із режимами насичення та відсічення транзистора. Крім того, за однакових граничних значень струму режим АВ дозволяє отримати дещо більшу вихідну потужність, ніж режим А.

Для досягнення високої ефективності роботи підсилювача важливу роль відіграє вихідне узгоджувальне коло. В ідеальному випадку воно повинно забезпечувати пригнічення гармонічних складових сигналу. У реальних схемах така умова частково реалізується завдяки частотним властивостям кола узгодження та паразитним параметрам самого

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транзистора. Водночас залишкові гармонічні складові можуть створювати додаткові фазові зсуви між струмом та напругою, що призводить до збільшення амплітуди напруги на виводі транзистора. У результаті це може негативно впливати на енергетичні характеристики підсилювача та обмежувати його вихідну потужність.

За недостатнього рівня вихідної ємності або відсутності відповідного резонансного контуру ефективність роботи підсилювального каскаду може суттєво знижуватись. У таких умовах гармонічні складові пригнічуються недостатньо ефективно, що призводить до додаткових втрат енергії та погіршення характеристик підсилювача. Одним із можливих способів покращення режиму роботи є збільшення вихідної ємності транзистора або включення додаткових реактивних елементів до узгоджувальної мережі. Однак у такому випадку необхідно забезпечити правильне узгодження з навантаженням на основній робочій частоті, щоб уникнути погіршення параметрів підсилення.

1.2. Сучасна елементна база підсилювачів дециметрового діапазону

Одним із ключових етапів розробки високочастотного підсилювача потужності є вибір активного елемента, оскільки саме характеристики транзистора визначають вихідну потужність, КП, ККД, теплові режими роботи та стабільність підсилювача. Для сучасних широкосмугових підсилювачів дециметрового діапазону використовуються переважно LDMOS-транзистори та GaN-транзистори. Кожен із цих типів має власні переваги та недоліки, що визначають сферу їх застосування.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Біполярні транзистори тривалий час широко використовувались у високочастотних підсилювачах потужності завдяки простоті схемотехнічної реалізації та достатньо високому коефіцієнту підсилення. Проте для сучасних широкосмугових систем їх використання обмежується через відносно невисокий ККД, складність забезпечення теплової стабільності та значну залежність параметрів від температури.

GaN-транзистори (на основі нітриду галію) є одним із найбільш сучасних рішень для побудови потужних ВЧ підсилювачів. Вони забезпечують високий ККД, значну вихідну потужність та можливість роботи на високих частотах. Однак такі транзистори мають високу вартість, потребують складнішого узгодження та спеціалізованих джерел живлення, що ускладнює їх використання у відносно простих та економічно доступних конструкціях.

У сучасних підсилювачах потужності дециметрового діапазону широкого поширення набули LDMOS-транзистори, які поєднують у собі високий ККД, хорошу теплову стабільність, значну вихідну потужність та відносно просту схемотехнічну реалізацію. Саме тому для розробки підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц було обрано BLP981, зображений на рис. 1.2.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 1.2 — Зображення транзистора BLP 981

Транзистор BLP981 є потужним LDMOS-транзистором, призначеним для роботи у дециметровому діапазоні частот. Його основною перевагою є можливість забезпечення значної вихідної потужності при високому коефіцієнті корисної дії та стабільній роботі у широкій смузі частот. Даний транзистор спеціально розроблений для використання у передавальних радіотехнічних системах, зокрема у широкосмугових підсилювачах потужності.

Однією з основних причин вибору транзистора BLP981 є його здатність працювати у діапазоні частот, що відповідає вимогам даної роботи. Підсилювач, який розробляється, повинен стабільно працювати у діапазоні 700–1050 МГц, а також забезпечувати можливість роботи у смугах шириною 50–100 МГц. Для таких умов необхідний транзистор із достатнім запасом за граничною частотою та стабільними параметрами підсилення у широкій смузі частот.

Важливим фактором є також вихідна потужність транзистора. Транзистор BLP981 дозволяє отримати вихідну потужність понад 100 Вт, що

повністю відповідає технічним вимогам до розроблюваного підсилювача. При цьому забезпечується достатній коефіцієнт підсилення, що дозволяє зменшити вимоги до попередніх каскадів підсилення.

Ще однією важливою перевагою BLP981 є високий коефіцієнт корисної дії. Для потужних високочастотних підсилювачів це має особливе значення, оскільки значна частина енергії перетворюється у тепло. Підвищення ККД дозволяє зменшити теплові втрати та спростити систему охолодження підсилювача. Для систем радіоелектронної боротьби, які можуть працювати у тривалому режимі випромінювання сигналів завад, питання тепловідведення є особливо важливим.

Транзистор BLP981 також характеризується хорошою тепловою стабільністю, що забезпечується технологією LDMOS. У порівнянні з біполярними транзисторами, LDMOS-транзистори менш чутливі до температурних змін параметрів та мають кращу стійкість до теплового пробою. Це підвищує надійність роботи підсилювача у режимах великої вихідної потужності.

Додатковою перевагою BLP981 є його доступність та наявність значної кількості технічної документації, прикладів схем та рекомендацій щодо практичного застосування. Це спрощує процес розробки підсилювача та дозволяє використовувати перевірені схемотехнічні рішення.

Для даної роботи транзистор BLP981 працює при напрузі живлення 40 В у режимі класу АВ зі струмом спокою 100 мА. Такий режим роботи забезпечує компроміс між коефіцієнтом корисної дії та рівнем нелінійних спотворень сигналу. Клас АВ є одним із найбільш поширених режимів роботи потужних високочастотних підсилювачів, оскільки дозволяє забезпечити достатньо високий ККД при збереженні прийнятної лінійності.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливою перевагою транзистора BLP981 є його висока стійкість до неузгодженого навантаження. Згідно з технічною документацією, транзистор здатний витримувати роботу при КСХН до 40:1 у всіх фазах навантаження. Така характеристика є особливо важливою для систем радіоелектронної боротьби, оскільки під час експлуатації у складних умовах можливі пошкодження або обрив антени, порушення узгодження фідерного тракту чи різкі зміни параметрів навантаження. У подібних режимах у вихідному каскаді виникає значна відбита потужність, яка може призвести до перегріву або виходу транзистора з ладу. Висока стійкість BLP981 до роботи при великих значеннях VSWR підвищує надійність підсилювача та дозволяє зберігати працездатність передавача навіть у аварійних або нестабільних режимах роботи, що є важливою вимогою для апаратури РЕБ.

Таким чином, вибір транзистора BLP981 для розробки підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц є обґрунтованим з точки зору вихідної потужності, робочого діапазону частот, коефіцієнта корисної дії, теплової стабільності та можливості практичної реалізації широкосмугового підсилювача для систем радіоелектронної боротьби.

1.3. Особливості побудови широкосмугових підсилювачів для систем РЕБ

Широкосмугові підсилювачі потужності є важливим елементом сучасних комплексів радіоелектронної боротьби, оскільки забезпечують формування потужних сигналів завад у значному діапазоні частот. На відміну від звичайних вузькосмугових підсилювачів, такі пристрої повинні ефективно працювати одночасно у широкій смузі частот без суттєвого погіршення основних характеристик.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Однією з основних особливостей широкосмугових підсилювачів є складність побудови узгоджувальних кіл. При збільшенні робочої смуги частот стає важче забезпечити однакові параметри підсилення та стабільний вихідний опір у всьому діапазоні. Через це у широкосмугових схемах часто використовуються мікросмужкові лінії передачі, трансформатори та багатоланкові LC-контури.

Для систем РЕБ важливо забезпечити не лише необхідний рівень вихідної потужності, але й можливість швидкої зміни робочої частоти. У сучасних комплексах радіоелектронної боротьби часто застосовується програмне керування передавачем, що дозволяє змінювати робочі смуги залежно від умов використання. У зв'язку з цим підсилювач повинен стабільно працювати у різних частотних діапазонах без необхідності додаткового ручного налаштування.

При побудові потужних широкосмугових підсилювачів значну увагу приділяють вибору режиму роботи транзистора. Найчастіше використовується режим класу АВ, який забезпечує компроміс між коефіцієнтом корисної дії та рівнем нелінійних спотворень. Такий режим дозволяє зменшити тепловиділення у порівнянні з класом А та одночасно забезпечити кращу лінійність сигналу, ніж у класі В.

Важливою особливістю підсилювачів для систем РЕБ є необхідність роботи при значних рівнях відбитої потужності. У польових умовах можливі пошкодження антени, зміна параметрів навантаження або обрив фідерного тракту, що призводить до погіршення узгодження. У таких випадках значна частина енергії відбивається назад у вихідний каскад, створюючи додаткове навантаження на транзистор. Саме тому для широкосмугових підсилювачів РЕБ використовуються транзистори з високою стійкістю до високих значень КСХН.

Ще однією особливістю потужних широкосмугових підсилювачів є необхідність ефективного охолодження. При роботі на високих рівнях потужності транзистор виділяє значну кількість тепла, тому для забезпечення стабільної роботи використовуються радіатори, системи активного охолодження та теплопровідні матеріали.

Таким чином, при проектуванні широкосмугових підсилювачів для систем РЕБ необхідно враховувати особливості узгодження у широкому діапазоні частот, стабільність роботи, стійкість до відбитої потужності, теплові режими та можливість інтеграції у системи з програмним керуванням частотними діапазонами.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто основні теоретичні засади побудови високочастотних підсилювачів потужності та проаналізовано їх основні характеристики. Розглянуто особливості режимів роботи підсилювачів класів А, В, С та АВ, а також визначено переваги використання режиму класу АВ для широкосмугових підсилювачів потужності систем РЕБ завдяки оптимальному співвідношенню між коефіцієнтом корисної дії та лінійністю сигналу.

Проведено аналіз сучасної елементної бази підсилювачів дециметрового діапазону та обґрунтовано доцільність використання LDMOS-транзистора BLP981 для розробки підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц. Визначено основні переваги даного транзистора, зокрема високу вихідну потужність, хорошу теплову стабільність, високий ККД та стійкість до значних рівнів відбитої потужності.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також були розглянуті особливості побудови широкосмугових підсилювачів для систем радіоелектронної боротьби, основні проблеми узгодження у широкому діапазоні частот, забезпечення стабільності роботи та захисту вихідного каскаду при роботі у складних умовах експлуатації. Отримані результати створюють теоретичну основу для подальшої розробки підсилювача потужності для передавача РЕБ.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ

Розробка широкосмугових високочастотних підсилювачів потужності потребує аналізу сучасних технічних рішень та існуючих аналогів. Порівняння характеристик готових підсилювачів дозволяє визначити основні тенденції побудови таких пристроїв, оцінити їх переваги та недоліки, а також сформулювати технічні вимоги до розроблюваного підсилювача.

Особливу увагу при порівнянні аналогів приділяють робочому діапазону частот, вихідній потужності, коефіцієнту корисної дії, типу елементної бази, стійкості до відбитої потужності та особливостям систем охолодження. Для систем радіоелектронної боротьби важливими є також можливість роботи у широкій смузі частот, стабільність параметрів при тривалих режимах навантаження та стійкість до роботи при значних значеннях КСХН.

У даному розділі буде проведено аналіз існуючих широкосмугових підсилювачів потужності дециметрового діапазону, які можуть використовуватись у системах РЕБ та передавальних радіотехнічних комплексах. За результатами аналізу буде визначено основні технічні рішення та характеристики, які доцільно використати при розробці власного підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц.

2.1. RWP15080-10

Як аналог широкосмугового підсилювача потужності для систем радіоелектронної боротьби розглядається підсилювач RWP15080-10 [6]

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зображений на рис. 2.1. Даний модуль є сучасним широкосмуговим підсилювачем, призначеним для роботи у військових та радіотехнічних системах. Основні технічні характеристики підсилювача при вхідній потужності -3дБм, напрузі живлення 32 В наведені у таблиці 1.



Рис. 2.1 — Широкосмуговий підсилювач потужності RWP15080-10

Таблиця 1

Параметри підсилювача RWP15080-10 в діапазоні 700 - 1000 МГц

Частота, МГц	Рвих, Вт	I, А	ККД, %
700	111	10,47	33,3
800	88	9,04	30,5
900	128	9,80	40,8
1000	104	8,92	36,5

Отже, підсилювач RWP15080-10 є сучасним широкосмуговим модулем, побудованим із використанням технології GaN-on-SiC, та призначений для роботи у системах радіоелектронної боротьби. Основною перевагою даного підсилювача є дуже широкий робочий діапазон частот, який охоплює область від 700 до 2500 МГц. Це дозволяє використовувати модуль у багатодіапазонних системах без необхідності перебудови вихідних узгоджувальних кіл.

Підсилювач забезпечує високий коефіцієнт підсилення та вихідну потужність понад 100 Вт у діапазоні 700–1050 МГц, що відповідає вимогам сучасних систем РЕБ. Також до переваг можна віднести використання сучасної GaN технології, яка забезпечує хороші теплові характеристики та можливість роботи при значних рівнях вихідної потужності.

Разом із тим, аналіз характеристик даного модуля показує наявність певних недоліків. Одним із них є відносно невелике допустиме значення коефіцієнта стоячої хвилі за напругою, яке становить лише 3:1. Для систем радіоелектронної боротьби, що можуть працювати у складних польових умовах, це є суттєвим обмеженням, оскільки у випадку пошкодження антени або обриву фідерного тракту у вихідному каскаді може виникати велика відбита потужність. У таких режимах підсилювач потребує додаткових систем захисту або автоматичного зниження потужності.

Ще одним недоліком є порівняно невисокий коефіцієнт корисної дії у межах робочого діапазону 700–1000 МГц. Значення ККД знаходиться приблизно на рівні 30–40 %, що призводить до значних теплових втрат та необхідності використання ефективної системи охолодження. При тривалій роботі у режимі максимальної потужності це може суттєво впливати на температурний режим модуля та загальну енергоефективність системи.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Таким чином, підсилювач RWP15080-10 є ефективним широкосмуговим рішенням для систем РЕБ завдяки великому робочому діапазону частот, високій вихідній потужності та використанню сучасної GaN технології. Однак відносно невисока стійкість до неузгодженого навантаження та помірний коефіцієнт корисної дії обмежують його ефективність у важких умовах експлуатації, що необхідно враховувати при проектуванні підсилювачів для спеціалізованих радіотехнічних систем.

2.2. RFLUPA0727GA

Як ще один аналог широкосмугового підсилювача потужності для систем радіоелектронної боротьби розглядається підсилювач RFLUPA0727GA [7] зображений на рис. 2.2. Даний модуль є широкосмуговим підсилювачем потужності, призначеним для роботи у телекомунікаційних та спеціалізованих радіотехнічних системах. Підсилювач працює у широкому діапазоні частот 700–2700 МГц та забезпечує вихідну потужність до 100 Вт.

Особливістю підсилювача є широкий робочий діапазон частот, високий коефіцієнт підсилення та наявність вбудованих систем моніторингу для можливої установки захисту. Основні технічні характеристики підсилювача при вхідній потужності 0 дБм, напрузі живлення 28 В наведені у таблиці 2.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.2 — Підсилювач потужності RFLUPA0727GA

Таблиця 2

Параметри підсилювача RFLUPA0727GA в діапазоні 700-1000 МГц

Частота, МГц	Рвих, Вт	I, А	ККД, %
700	135	9,8	49,2
800	115	9	45,6
900	105	8	46,9
1000	115	8,5	48,3

Отже, підсилювач RFLUPA0727GA є сучасним широкосмуговим ВЧ модулем, який забезпечує високу вихідну потужність у широкому діапазоні частот та може використовуватись у системах радіоелектронної боротьби, радіолокації та телекомунікаційних комплексах. Основною перевагою даного підсилювача є широкий робочий діапазон 700–2700 МГц.

У межах діапазону 700–1050 МГц підсилювач забезпечує вихідну потужність від 105 до 135 Вт при коефіцієнті корисної дії близько 45–50 %, що є хорошим показником для широкосмугових підсилювачів великої

потужності. Також модуль характеризується високим коефіцієнтом підсилення та стабільними параметрами у всьому робочому діапазоні частот.

Підсилювач RFLUPA0727GA також містить додаткові виходи моніторингу параметрів роботи модуля. У конструкції передбачені аналогові сигнали контролю струму споживання та температури, які формуються у вигляді відповідних рівнів напруги. Це дозволяє підключати підсилювач до зовнішнього блоку або системи керування для постійного контролю режимів роботи, температурного стану та споживаного струму під час експлуатації. Наявність таких виходів спрощує реалізацію системи моніторингу та автоматичного вимкнення при перевищенні допустимих параметрів. Разом із тим, у модулі відсутній вбудований захист від відбитої потужності або автоматичне вимкнення при перевищенні допустимого значення КСХН, що може бути критичним недоліком при використанні у системах РЕБ та роботі у складних польових умовах.

До переваг підсилювача можна віднести використання сучасної GaN технології, компактне виконання та наявність вбудованих систем захисту. Разом із тим, максимально допустиме значення КСХН становить лише 3:1, що є недостатньо великим показником для систем радіоелектронної боротьби, які можуть працювати у складних польових умовах. При пошкодженні антени або значному неузгодженні навантаження можливе виникнення великої відбитої потужності, що створює додаткове навантаження на вихідний каскад підсилювача.

2.3. 700-1000 МГц GaN-Lora RF Power Amplifier

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Згідно з технічними характеристиками, модуль 700–1000 MHz 100W GaN RF Power Amplifier [8], зображений на рис. 2.3 забезпечує вихідну потужність до 100 Вт у всьому робочому діапазоні частот при напрузі живлення 28 В та споживаному струмі до 7,3 А. При таких параметрах споживана потужність становить близько 204 Вт, що відповідає коефіцієнту корисної дії на рівні приблизно 49 %. Для широкосмугового підсилювача потужності це є достатньо хорошим показником, особливо враховуючи використання GaN-технології та роботу у широкому діапазоні частот без додаткового перестроювання узгоджувальних кіл.

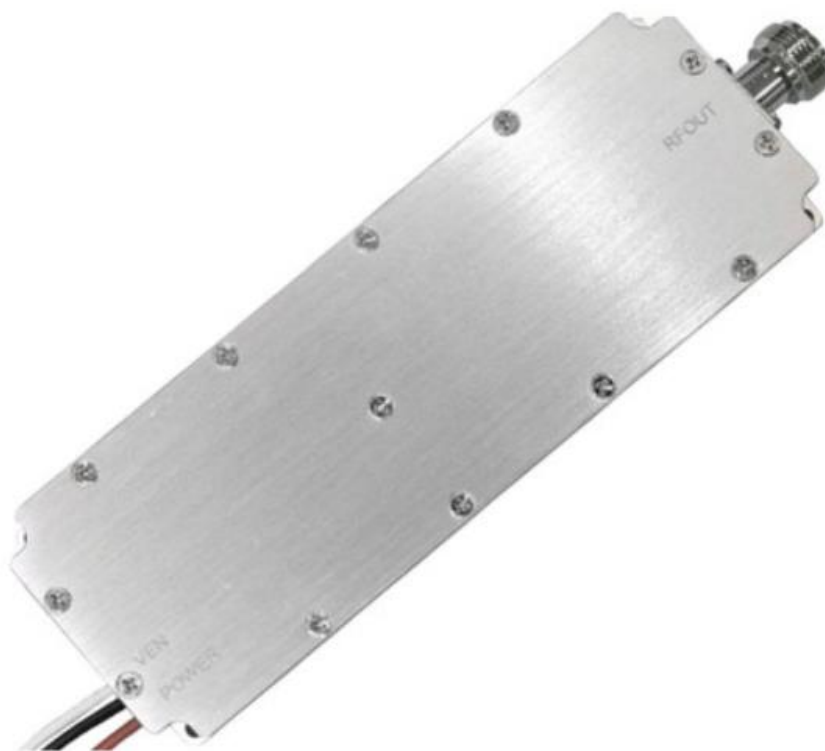


Рис. 2.3 — Підсилювач потужності 700-1000 МГц GaN-Lora RF Power Amplifier

Однією з головних переваг даного модуля є його призначення для систем радіоелектронної боротьби та антидронових комплексів. На відміну

від багатьох універсальних широкосмугових підсилювачів, цей модуль спеціально розрахований на роботу у діапазоні 700–1000 МГц, який активно використовується у сучасних системах передачі даних, керування безпілотними літальними апаратами та інших радіотехнічних засобах. Завдяки цьому підсилювач має достатньо стабільні характеристики саме у необхідному діапазоні частот.

Разом із тим, практичний досвід тестування подібних модулів показує наявність ряду суттєвих недоліків. Незважаючи на заявлений високий ККД, при роботі на максимальній потужності модуль має значне тепловиділення та дуже сильно нагрівається. Стандартного корпусного тепловідведення зазвичай недостатньо для тривалої стабільної роботи, тому для нормальної експлуатації необхідне встановлення підсилювача на додатковий масивний радіатор із системою активного охолодження. Особливо критичним це стає при тривалій роботі у режимах безперервного випромінювання сигналів завад, характерних для систем РЕБ.

Ще однією особливістю таких модулів є використання маловідомих або спеціалізованих транзисторів китайського виробництва. У більшості випадків виробники не надають повної технічної документації на активні елементи, а самі транзистори практично неможливо придбати окремо у вільному доступі. У випадку виходу транзистора з ладу ремонт підсилювача суттєво ускладнюється або стає економічно недоцільним. Крім того, це ускладнює проведення точного схемотехнічного аналізу та прогнозування реальних режимів роботи модуля.

Суттєвим недоліком подібних підсилювачів є також низька стійкість до роботи при неузгодженому навантаженні. У таких умовах модулі цього типу часто працюють нестабільно, переходять у аварійний режим або виходять з ладу через перевантаження вихідного каскаду. На практиці це є однією з

основних проблем дешевих широкосмугових підсилювачів китайського виробництва.

Таким чином, даний модуль є достатньо ефективним та компактним рішенням для побудови широкосмугових передавачів РЕБ у діапазоні 700–1000 МГц, однак його використання потребує забезпечення ефективного охолодження, додаткового захисту від відбитої потужності та врахування обмеженої ремонтпридатності через використання специфічної елементної бази.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено аналіз сучасних широкосмугових підсилювачів потужності, які можуть використовуватись у системах радіоелектронної боротьби та передавальних радіотехнічних комплексах. Розглянуті аналоги мають вихідну потужність близько 100 Вт та працюють у діапазонах частот, близьких до 700–1050 МГц.

У результаті аналізу встановлено, що підсилювачі RWP15080-10 та RFLUPA0727GA характеризуються дуже широким робочим діапазоном частот, високим коефіцієнтом підсилення та використанням сучасної GaN-технології. Разом із тим, дані модулі мають і ряд недоліків, які обмежують доцільність їх використання у системах РЕБ, що працюють у важких польових умовах. Основними недоліками є відносно низька стійкість до неузгодженого навантаження, значне тепловиділення та необхідність використання ефективних систем активного охолодження. Крім того, застосування спеціалізованих GaN-транзисторів ускладнює ремонт та обслуговування таких модулів через обмежену доступність елементної бази.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також було розглянуто спеціалізований модуль 700–1000 MHz 100W GaN RF Power Amplifier, орієнтований на використання у антидронових системах. Даний модуль має кращу відповідність необхідному робочому діапазону частот та достатньо високий коефіцієнт корисної дії, однак також характеризується значним тепловиділенням, низькою стійкістю до відбитої потужності та використанням малодоступної елементної бази китайського виробництва.

У результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що для розробки підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц доцільним є використання технології LDMOS. У порівнянні з GaN-рішеннями, LDMOS-транзистори забезпечують кращу стійкість до роботи при неузгодженому навантаженні, мають вищу надійність у важких режимах експлуатації та простіше реалізуються у широкосмугових схемах великої потужності.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБКА ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ ДІАПАЗОНУ 700–1050 МГц

При розробці широкосмугового підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц основна увага приділялась забезпеченню високої вихідної потужності, стабільної роботи у широкій смузі частот, ефективного тепловідведення та стійкості до роботи при неузгодженому навантаженні. Як активний елемент було обрано BLP981, який забезпечує необхідну вихідну потужність та характеризується високою стійкістю до відбитої потужності, що є важливим для систем радіоелектронної боротьби.

Конструктивно підсилювач складається з двох окремих друкованих плат — плати вхідного кола та плати вихідного кола. Таке рішення дозволяє спростити конструкцію підсилювача, покращити тепловідведення від транзистора та забезпечити більш зручне розташування елементів узгоджувальних кіл. Транзистор припаюється безпосередньо на металеву теплопровідну підкладку, яка забезпечує ефективне відведення тепла під час роботи на великій потужності. Після монтажу транзистора окремо встановлюються плати вхідного та вихідного кіл, які механічно фіксуються відносно підкладки та припаюються до відповідних виводів транзистора.

Для плати вхідного кола використовується матеріал FR-4. Це обумовлено тим, що у вхідному колі рівень високочастотної потужності є відносно невеликим, тому втрати у діелектрику не мають критичного впливу на роботу підсилювача. Крім того, FR-4 має невисоку вартість, хорошу механічну міцність та простий у виготовленні, що дозволяє зменшити загальну вартість конструкції.

На платі вхідного кола також розміщуються допоміжні схеми керування та захисту підсилювача. Однією з таких функцій є керування

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

системою охолодження. Для забезпечення стабільного температурного режиму роботи передбачене використання вентиляторів активного охолодження. Це дозволяє зменшити нагрів транзистора та підвищити надійність роботи підсилювача при тривалих режимах роботи.

Також на платі реалізовано захист по температурі. Контроль температури здійснюється за допомогою терморезистора, встановленого поблизу транзистора. При перевищенні допустимого температурного порогу схема захисту вимикає напругу зміщення на транзисторі. Наявність такого захисту є особливо важливою для систем РЕБ, де підсилювач може тривалий час працювати у режимі максимальної вихідної потужності.

Для вихідного кола використовується високочастотний матеріал Rogers RO4350B. У вихідному каскаді присутні значні рівні високочастотної потужності та струму, тому параметри друкованої плати суттєво впливають на втрати сигналу, узгодження та коефіцієнт корисної дії підсилювача. Матеріал RO4350B має значно менші діелектричні втрати у порівнянні з FR-4, стабільну діелектричну проникність та кращі характеристики на високих частотах. Це дозволяє зменшити втрати у вихідному колі та забезпечити ефективну роботу підсилювача у широкому діапазоні частот.

Окрему увагу при проектуванні було приділено тепловому режиму роботи підсилювача. При вихідній потужності понад 100 Вт значна частина енергії перетворюється у тепло, тому транзистор припаюється на мідну пластину, яка надалі монтується на радіатор із системою активного охолодження. Така конструкція дозволяє підтримувати допустимий температурний режим транзистора при тривалій роботі.

Розроблюваний підсилювач призначений для використання у складі передавача радіоелектронної боротьби з програмним керуванням робочими частотами. Передбачається можливість вибору робочої смуги шириною 50–

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

100 МГц у межах діапазону 700–1050 МГц залежно від поставлених задач та необхідного діапазону придушення сигналів.

У складі передавального комплексу також передбачається можливість роботи як від внутрішнього ГКН, так і від зовнішнього джерела високочастотного сигналу. Для формування сигналів завад може використовуватись внутрішній генератор із програмним керуванням робочою частотою, що дозволяє оперативно змінювати робочі діапазони залежно від поставлених задач. Крім цього, конструкцією передбачена можливість подачі зовнішнього ВЧ сигналу або готової завади від сторонніх генераторів чи цифрових систем формування сигналів.

Максимально допустимий рівень вхідного сигналу для системи РЕБ становить мінус 10 дБм. Даний рівень є вхідним сигналом для передавального комплексу та використовується на початкових каскадах підсилення ВЧ сигналу. Після проходження попередніх каскадів підсилення сигнал надходить на вхід розроблюваного підсилювача потужності вже з рівнем близько 2–2,3 Вт, що забезпечує необхідний режим роботи вихідного каскаду на транзисторі VLP981 та дозволяє отримати вихідну потужність понад 100 Вт у діапазоні 700–1050 МГц. Така структура побудови передавального тракту дозволяє забезпечити стабільне підсилення сигналу, зменшити вплив шумів та оптимізувати режими роботи кожного каскаду підсилення.

На виході попереднього підсилювача встановлюється суматор, який використовується для розв'язки попереднього та кінцевого каскадів підсилення. Необхідність використання такого вузла обумовлена тим, що кінцевий широкосмуговий підсилювач має відносно погані зворотні втрати через роботу у дуже широкому діапазоні частот 700–1050 МГц. У таких

умовах частина сигналу буде відбиватись назад у попередній каскад, що негативно впливає на стабільність роботи системи та підсилення.

Використання суматора дозволяє покращити узгодження між каскадами, зменшити вплив відбитої потужності на попередній підсилювач але погіршує ККД системи.

Як попередній каскад підсилення використовується плата від існуючої системи радіоелектронної боротьби діапазону 400–700 МГц. Для адаптації даної плати до роботи у діапазоні 700–1050 МГц було виконано заміну окремих високочастотних елементів, зокрема подільників потужності, суматорів та фільтра. Такий підхід дозволяє використати вже перевірене схемотехнічне рішення та суттєво спростити розробку попереднього каскаду підсилення.

Модернізація існуючої плати обумовлена необхідністю зміни робочого діапазону частот, оскільки елементи узгодження та фільтрації мають значний вплив на характеристики підсилення, рівень втрат та стабільність роботи системи. Заміна подільників та суматорів дозволяє забезпечити коректну роботу широкосмужових каскадів у новому діапазоні частот, а встановлення нового вихідного фільтра забезпечує необхідне пригнічення гармонік. Плата попереднього підсилювача в корпусі зображена на рис. 3.1.

На платі попереднього підсилювача також встановлюється модуль процесора, який забезпечує керування основними режимами роботи передавального комплексу. Модуль процесора виконує керування живленням каскадів попереднього підсилювача, увімкненням та вимкненням внутрішнього ГКН, а також формуванням керуючого сигналу налаштування для встановлення необхідної робочої частоти генератора.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

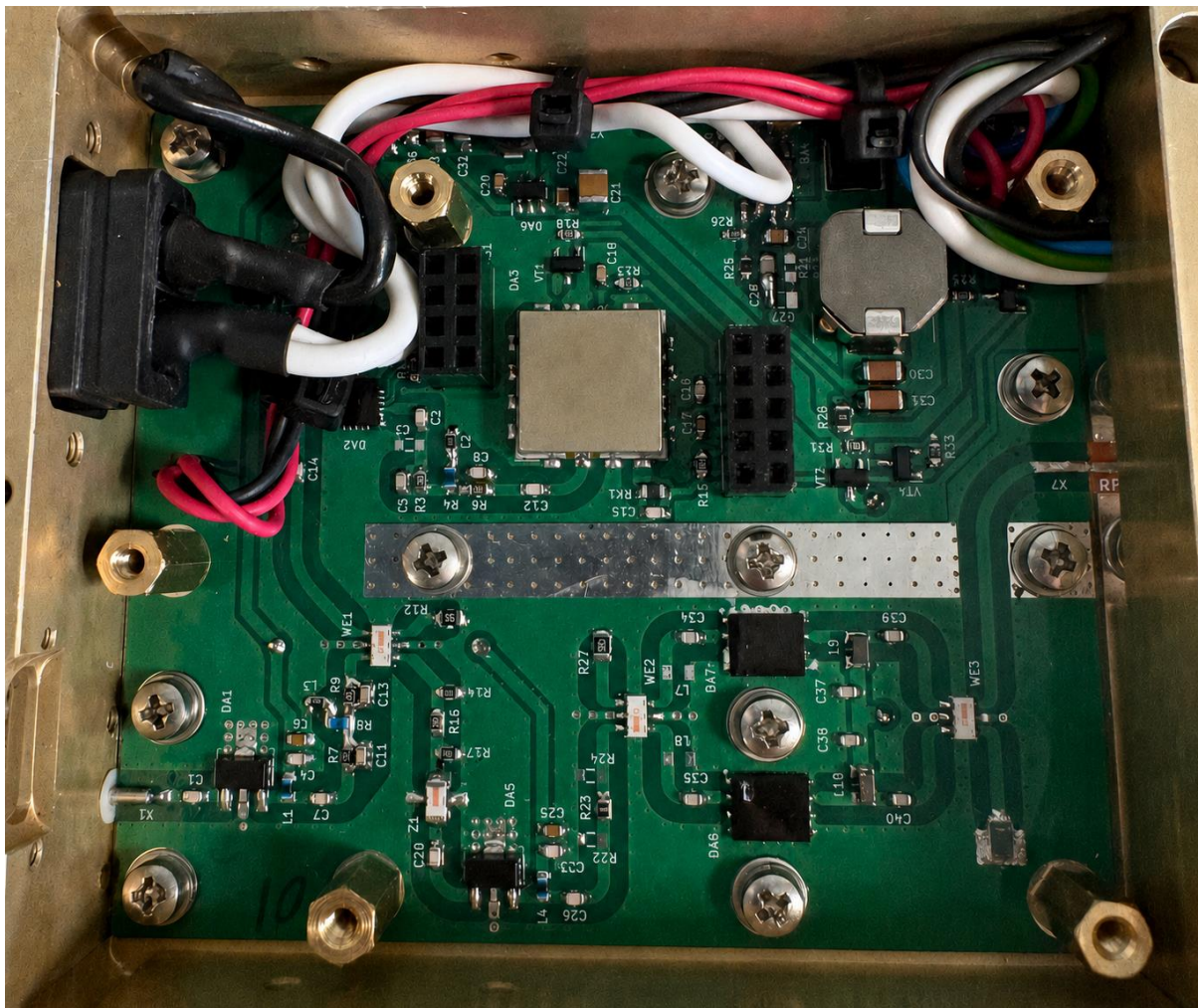


Рис. 3.1 — Плата попереднього підсилювача

Крім цього, модуль процесора забезпечує програмне встановлення робочих частот у межах необхідного діапазону та регулювання рівня вихідної потужності всього передавального комплексу. Зміна рівня сигналу з генератора дозволяє керувати режимом роботи наступних каскадів підсилення та, відповідно, змінювати кінцеву вихідну потужність підсилювача. Плата модуля процесора встановленого в корпусі зображена на рис. 3.2.

Також модуль процесора може здійснювати контроль допоміжних параметрів системи, зокрема температури. Це дозволяє реалізувати

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

PI21.468732.001 ПЗ

Арк.

35

централізовану систему керування та захисту передавального комплексу, що є особливо важливим для систем радіоелектронної боротьби, які працюють у режимах тривалого випромінювання сигналів великої потужності.

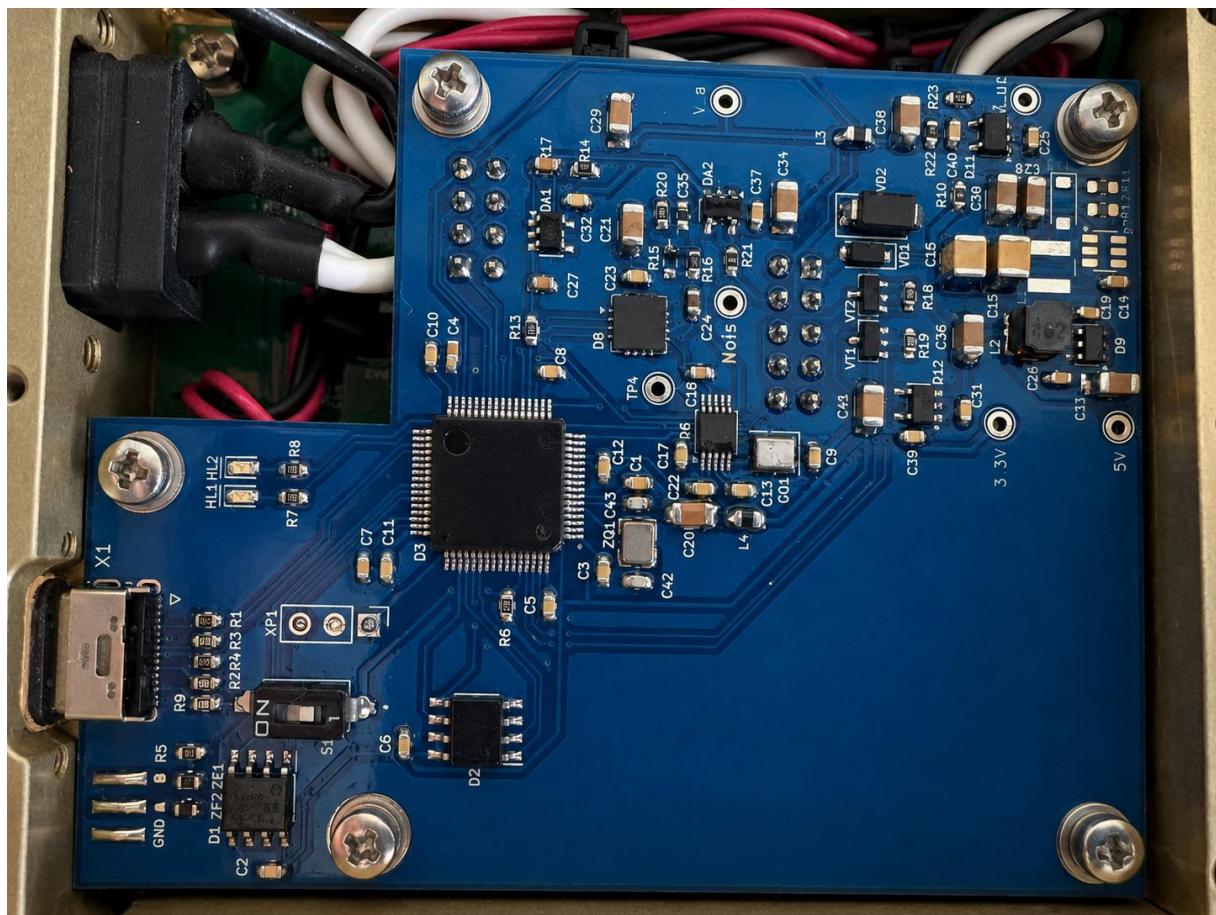


Рис. 3.2 — Плата модуля процесора

3.1. Розробка схеми та плати вхідного кола

При розробці плати вхідного кола значна увага приділялась забезпеченню стабільного теплового режиму роботи підсилювача потужності. Оскільки вихідний каскад працює при великій високочастотній

потужності, значна частина енергії, яка споживається транзистором, перетворюється у тепло. При роботі підсилювача у режимах тривалого випромінювання температура транзистора та елементів вихідного кола може швидко зростати, що негативно впливає на стабільність параметрів підсилювача, а саме коефіцієнта підсилення, коефіцієнта корисної дії. Саме тому на платі вхідного кола реалізовано окрему систему автоматичного керування охолодженням та аварійного температурного захисту.

Для контролю температури використовується терморезистор. Даний тип терморезисторів має негативний температурний коефіцієнт опору. Це означає, що при підвищенні температури його електричний опір зменшується. При низькій температурі терморезистор має великий опір, а зі зростанням температури його опір поступово падає. Саме така залежність дозволяє використовувати терморезистори як прості та надійні датчики температури у системах охолодження та захисту.

Терморезистор встановлюється безпосередньо поблизу транзистора підсилювача. Таке розташування дозволяє максимально точно контролювати температуру найбільш нагрітих елементів конструкції. Зміна температури радіатора викликає зміну опору терморезистора, а відповідно і зміну напруги у вимірювальному колі.

Терморезистор разом із постійними резисторами утворює дільник напруги, сигнал з якого подається на вхід компаратора LM2903. Компаратор постійно порівнює напругу з терморезистора із опорною напругою, сформованою окремим резистивним дільником. При досягненні встановленої температури компаратор змінює свій вихідний стан та формує сигнал керування для ввімкнення вентиляторів охолодження.

При температурі приблизно 45 °C опір терморезистора зменшується до порогового значення, внаслідок чого напруга на вході компаратора досягає

рівня спрацювання. Після цього вихід компаратора переходить у активний стан та відкриває польовий транзистор IRLML0030, який подає живлення на вентилятори охолодження.

Польовий транзистор використовується як електронний ключ для комутації живлення вентиляторів. Таке рішення дозволяє розвантажити вихід компаратора та забезпечити надійне керування струмом вентиляторів. Використання MOSFET транзистора також дозволяє зменшити втрати потужності у колі керування.

Однією з важливих особливостей схеми є реалізація гістерезису компаратора. Без гістерезису при температурі, близькій до порогу спрацювання, вентилятори могли б багаторазово вмикатись та вимикатись навіть при незначних температурних коливаннях. Це призводило б до нестабільної роботи системи охолодження, появи імпульсних струмів у колі живлення та прискореного зносу вентиляторів.

Для усунення цього недоліку у схемі використовується позитивний зворотний зв'язок через резистор R8. Частина вихідної напруги компаратора повертається назад на його вхід та змінює поріг спрацювання залежно від поточного стану виходу. У результаті температура ввімкнення вентилятора є вищою за температуру його вимкнення. Після ввімкнення вентиляторів продовжують працювати доти, доки температура не знизиться на декілька градусів нижче початкового порога. Такий режим роботи суттєво підвищує стабільність системи охолодження.

Окрім системи автоматичного керування вентиляторами, на платі реалізовано аварійний температурний захист. Для цього використовується друга частина мікросхеми LM2903 із окремо встановленим порогом спрацювання. Температура спрацювання захисту встановлюється вищою за температуру ввімкнення вентиляторів. Таким чином система працює у два

етапи. Спочатку при нагріванні приблизно до 45 °С автоматично вмикаються вентилятори охолодження. Якщо ж охолодження є недостатнім і температура продовжує зростати, то при досягненні аварійного рівня, приблизно 65 °С, спрацьовує температурний захист.

Після спрацювання захисту компаратор формує сигнал аварії та відкриває другий польовий транзистор, який вимикає живлення каскадів попереднього підсилювача, подачу зміщення на транзистор вихідного каскаду. Це дозволяє запобігти перегріву транзистора підсилювача та виходу його з ладу.

Для додаткової стабільності роботи у схемі використовуються конденсатори фільтрації, які зменшують вплив високочастотних завад та перешкод на роботу компараторів. Оскільки підсилювач працює у потужному високочастотному режимі, у схемі можуть виникати значні імпульсні та високочастотні перешкоди, які здатні викликати помилкові спрацювання системи охолодження або захисту. Саме тому правильна фільтрація та розведення плати є важливою частиною проектування.

Реалізація автоматичного керування вентиляторами та системи аварійного температурного захисту дозволяє суттєво підвищити надійність роботи підсилювача потужності при тривалих режимах випромінювання великої потужності, характерних для систем радіоелектронної боротьби. Також така система дозволяє зменшити теплове навантаження на транзистор, покращити стабільність параметрів підсилювача та підвищити загальний ресурс роботи пристрою. Схеми ввімкнення вентиляторів та термозахисту, розроблена в програмному забезпеченні KiCad зображена на рис. 3.3.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

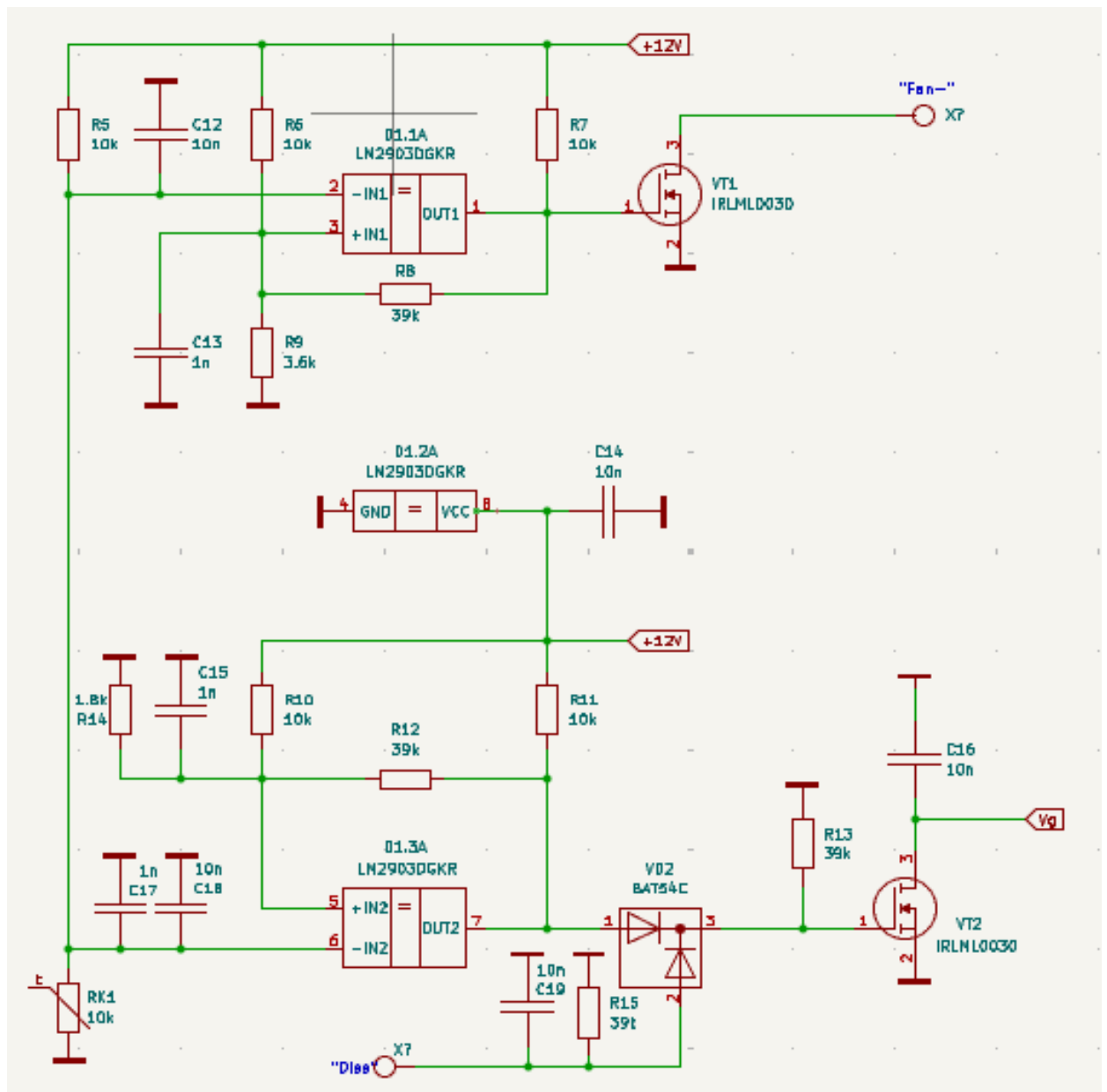


Рис. 3.3 — Схема керування вентиляторами та термозахистом підсилювача

Наступним етапом стала розробка вхідного кола підсилювача потужності. Основним завданням даного етапу було забезпечення широкосмугового узгодження між джерелом сигналу та вхідним опором транзистора BLP981 у діапазоні частот 700–1050 МГц.

Розрахунок широкосмугового трансформатора, а також підбір номіналів узгоджувальних конденсаторів виконувався у програмному

середовищі AWR Design Environment. Дане програмне забезпечення дозволяє виконувати моделювання високочастотних кіл, аналізувати зворотні втрати.

Під час моделювання проводився підбір параметрів широкосмугового трансформатора для забезпечення необхідного коефіцієнта трансформації імпедансу між 50-омним трактом та вхідним опором транзистора. Також у процесі розрахунку визначались оптимальні номінали конденсаторів, які забезпечують мінімальні втрати сигналу та стабільну роботу підсилювача у всьому робочому діапазоні частот. Моделювання вхідного кола зображене на рис. 3.4.

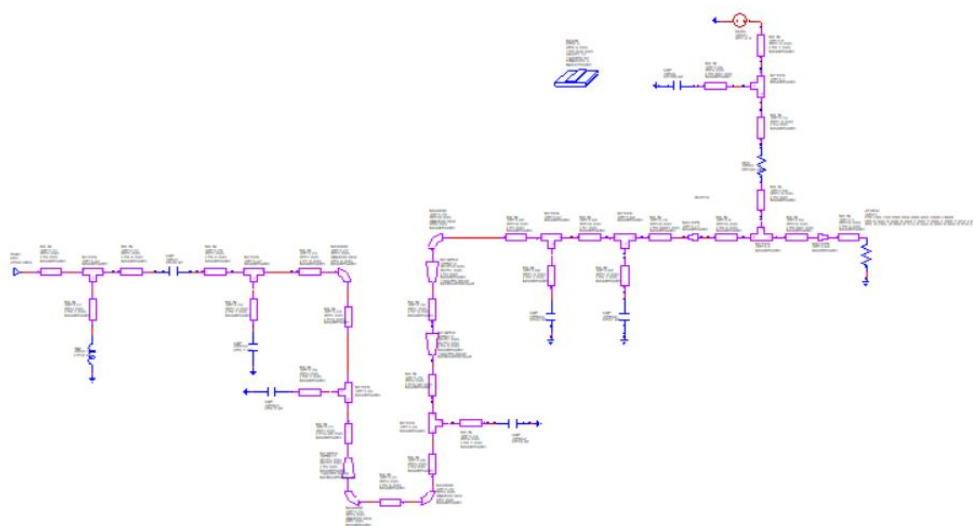


Рис. 3.4 — Схема вхідного кола узгодження транзистора, розрахована в програмі AWR Design Environment

Результати розрахунку зворотних втрат вхідного кола підсилювача у діапазоні частот 700–1050 МГц наведені на рис. 3.4. Отримане узгодження вхідного кола не є ідеальним, що обумовлено необхідністю забезпечення роботи підсилювача у широкому діапазоні частот. При побудові широкосмугових підсилювачів досягнення хорошого узгодження одночасно у всій смузі частот є складною задачею, тому рівень зворотних втрат у

окремих ділянках діапазону може погіршуватись. У даному випадку пріоритетом була саме ширина робочого діапазону.

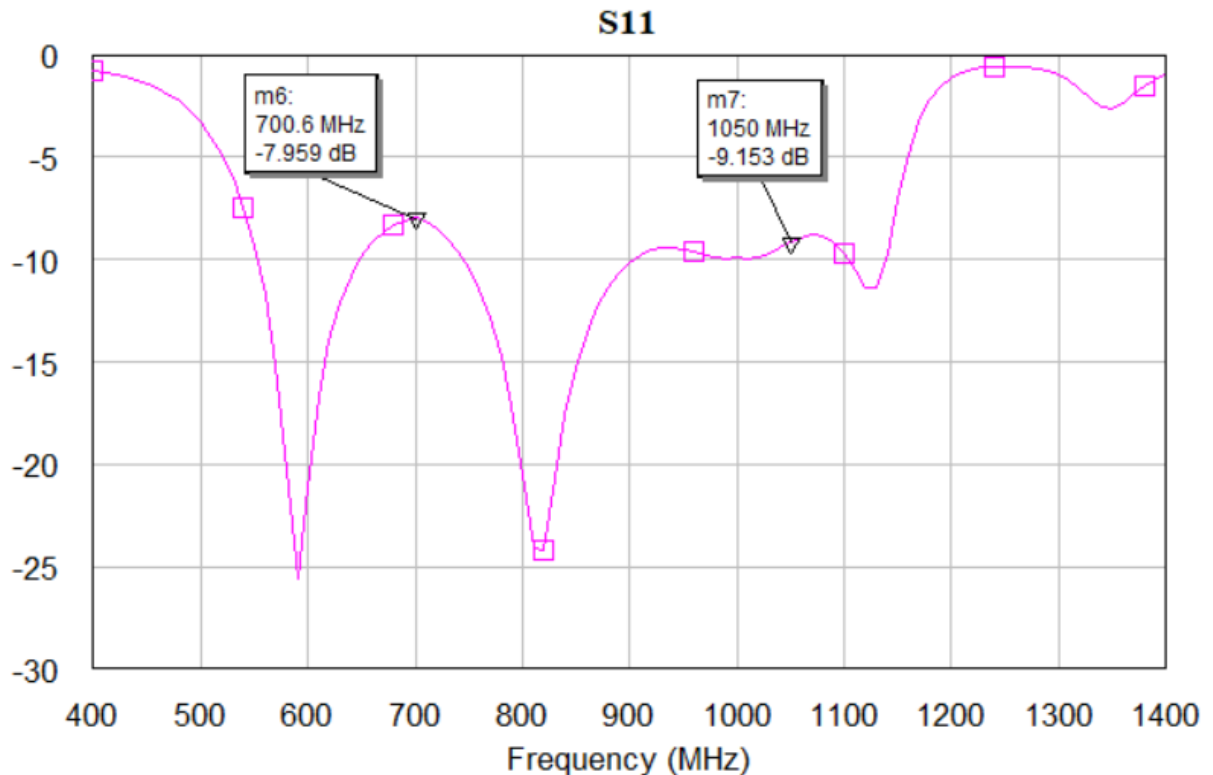


Рис. 3.5 — Розраховані зворотні втрати по входу підсилювача

Погіршення узгодження частково компенсується використанням попереднього підсилювача із запасом по вихідній потужності. Це дозволяє забезпечити необхідний рівень сигналу на вході кінцевого каскаду навіть при наявності додаткових втрат у вхідному узгоджувальному колі.

Схема електрична принципова вхідного кола підсилювача була розроблена у програмному середовищі KiCad, зображена на рис. 3.6.

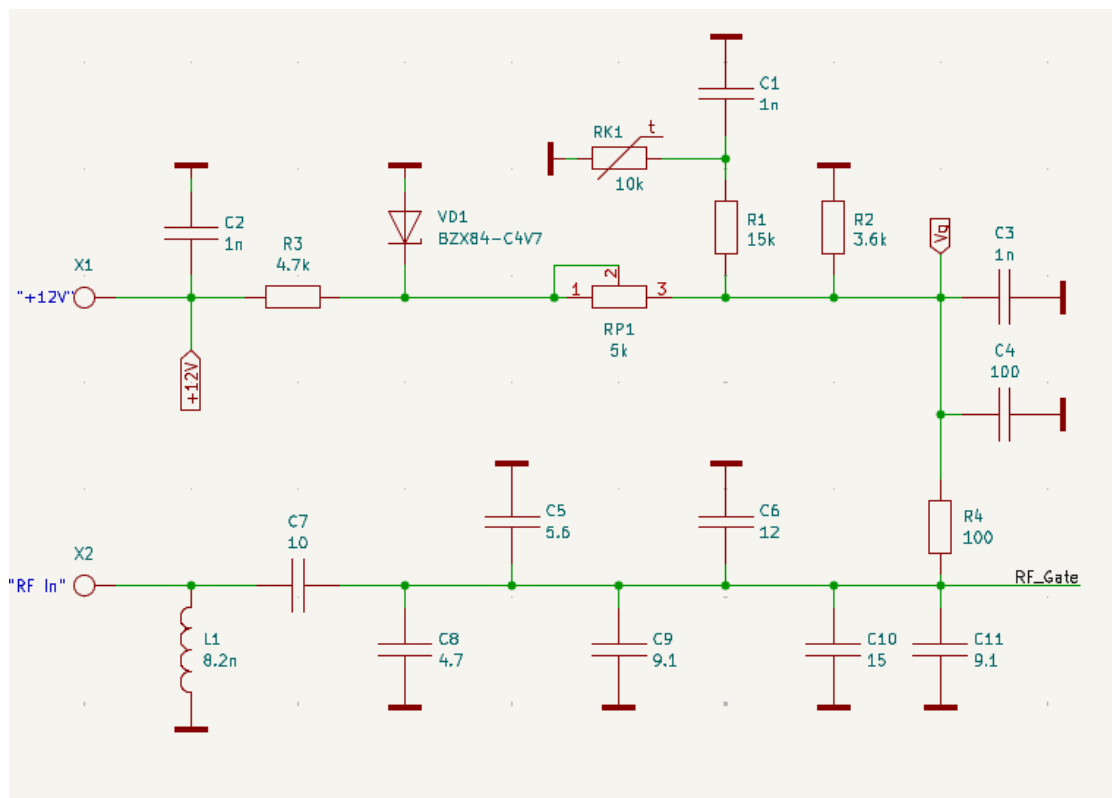


Рис. 3.6 — Схема вхідного кола підсилювача

Для забезпечення стабільної роботи підсилювача потужності у широкому температурному діапазоні у схемі реалізовано систему термокомпенсації струму спокою транзистора. Необхідність термокомпенсації обумовлена тим, що параметри LDMOS транзистора залежать від температури кристала. Під час роботи підсилювача на великій потужності транзистор нагрівається, що призводить до зміни його вхідних характеристик та режиму зміщення.

При підвищенні температури у польових транзисторах змінюється порогова напруга відкриття затвора, внаслідок чого струм спокою може змінюватися навіть при незначній зміні напруги зміщення. Без використання термокомпенсації це може призвести до зміни коефіцієнта підсилення, зниження вихідної потужності нижче номінальної.

Для компенсації температурного впливу у схемі використовується терморезистор RK1. Даний терморезистор має негативний температурний

коефіцієнт опору, тобто при підвищенні температури його опір зменшується. Терморезистор включений у коло формування напруги зміщення затвора транзистора та змінює напругу зміщення залежно від температури.

При нагріванні транзистора опір терморезистора зменшується, що викликає зміну напруги зміщення на затворі. У результаті схема автоматично коригує струм спокою транзистора та частково компенсує температурний дрейф параметрів. Такий принцип роботи дозволяє підтримувати більш стабільний режим роботи підсилювача при зміні температури.

Струм спокою транзистора встановлюється за допомогою потенціометра RP1. Потенціометр дозволяє плавно регулювати напругу зміщення затвора та задавати необхідний режим роботи підсилювача. Саме від значення струму спокою залежить клас роботи підсилювача, рівень нелінійних спотворень, ККД та тепловиділення транзистора.

У даному підсилювачі струм спокою вибирається таким чином, щоб забезпечити роботу у режимі класу АВ. Такий режим дозволяє отримати компроміс між високим коефіцієнтом корисної дії та достатньою лінійністю підсилення. При надто малому струмі спокою можуть зростати нелінійні спотворення та погіршуватись якість сигналу, а при надто великому — суттєво збільшується тепловиділення навіть без подачі високочастотного сигналу. Зображення 3D-моделі плати вхідного кола, змодельованої в програмі Autodesk Inventor представлено на рис. 3.7.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

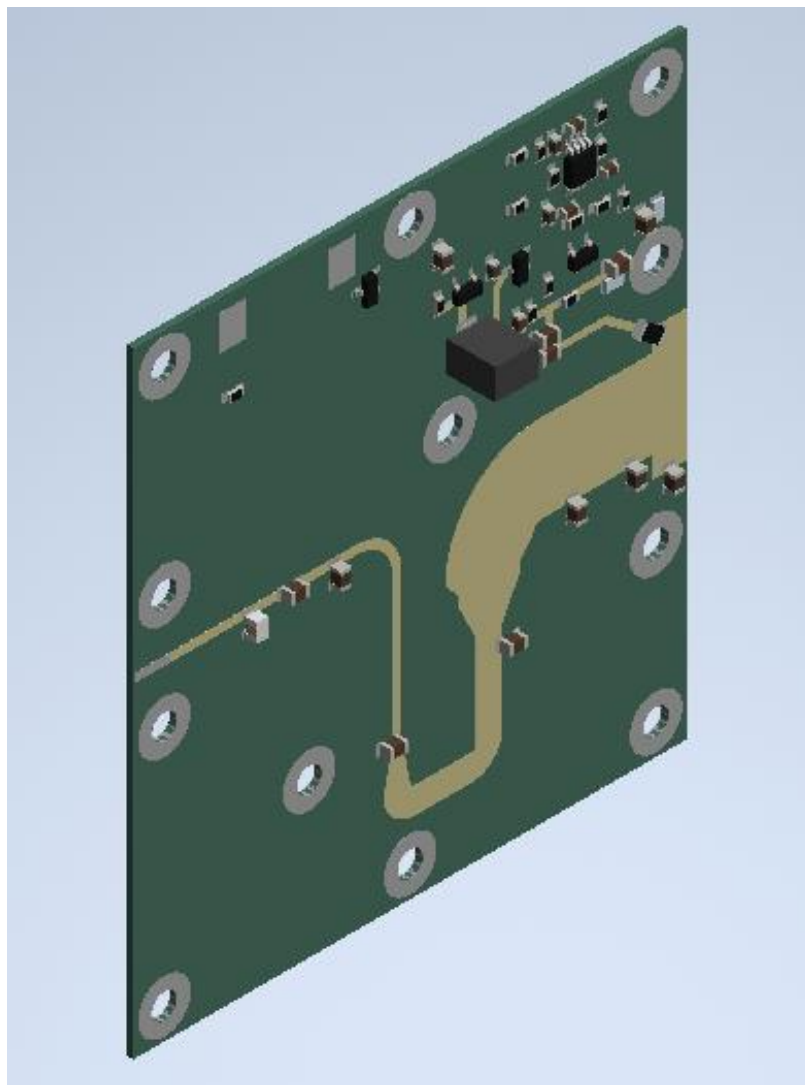


Рис. 3.7 — Плата вхідного кола

Стабілітрон VD1 використовується для стабілізації напруги живлення кола зміщення та захисту затвора транзистора від перевищення допустимої напруги. Конденсатори C1–C4 забезпечують фільтрацію шумів та високочастотних перешкод у колі зміщення.

Таким чином, реалізована схема термокомпенсації дозволяє автоматично підтримувати рівень вихідної потужності підсилювача при зміні температури у режимах тривалого випромінювання великої потужності.

Збиральне креслення плати вхідного кола наведене в додатку В.

3.2. Розробка схеми та плати вихідного кола

Трансформатор вихідного кола був розрахований та промодельований у програмному середовищі AWR Microwave Office, зображений на рис. 3.8. Під час розрахунку враховувались робочий діапазон частот підсилювача 700–1050 МГц та вихідний імпеданс транзистора. За результатами моделювання були визначені геометричні параметри друкованого трансформатора, які забезпечують необхідний коефіцієнт передачі потужності та допустимий рівень зворотних втрат у всій робочій смузі частот.

Для реалізації вихідного трансформатора обрано високочастотний діелектричний матеріал Rogers RO4350. Даний матеріал широко використовується у ВЧ та НВЧ пристроях завдяки низькому значенню діелектричних втрат, стабільності діелектричної проникності та хорошим температурним характеристикам. Використання RO4350 дозволяє мінімізувати втрати енергії у мікросмужкових лініях та забезпечити стабільність параметрів вихідного кола у широкому діапазоні частот.

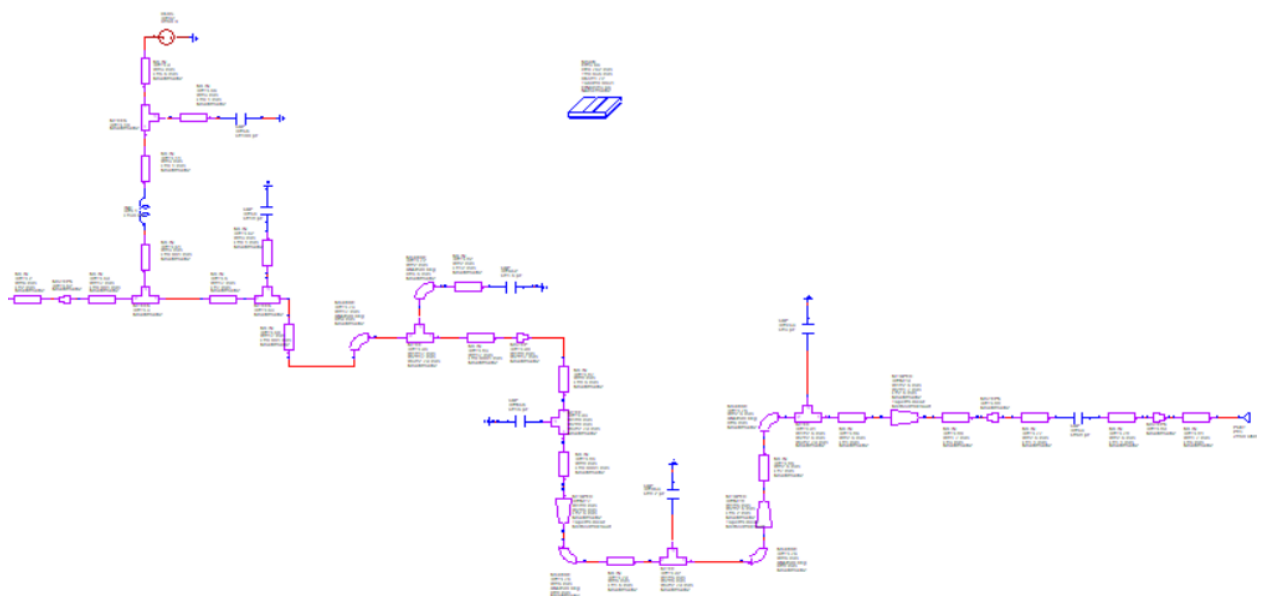


Рис. 3.8 — Схема вихідного кола підсилювача розрахована в AWR

Модель трансформатора була оптимізована в AWR шляхом багаторазового коригування параметрів мікросмужкових елементів для досягнення необхідних характеристик вихідного кола.

Розрахований друкований трансформатор забезпечує узгодження виходу транзистора з навантаженням. Використання мікросмужкової реалізації трансформатора спрощує конструкцію пристрою, покращує повторюваність параметрів та забезпечує компактність вихідного каскаду підсилювача. Струм спокою транзистора встановлено на рівні 100 мА. Схема вихідного кола підсилювача зображена на рис. 3.9.

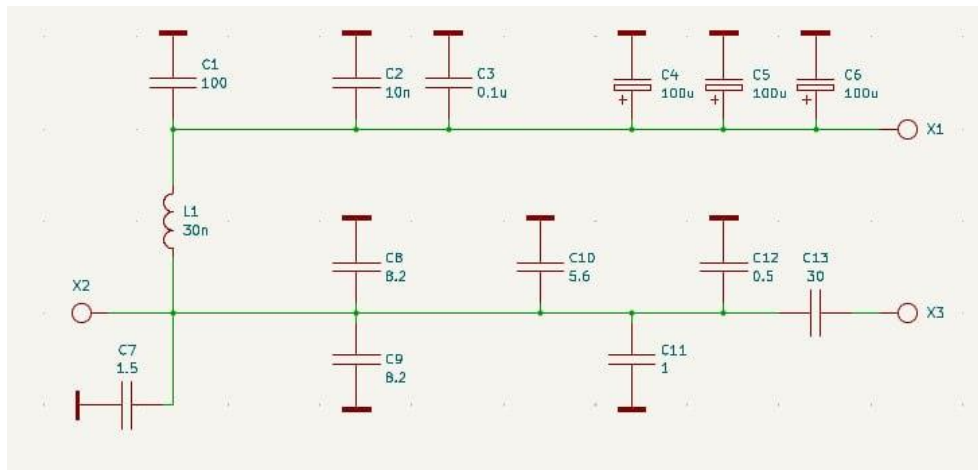


Рис. 3.9 — Схема вхідного кола підсилювача

Зображення друкованої плати та попереднього розташування елементів показано на рис. 3.10.

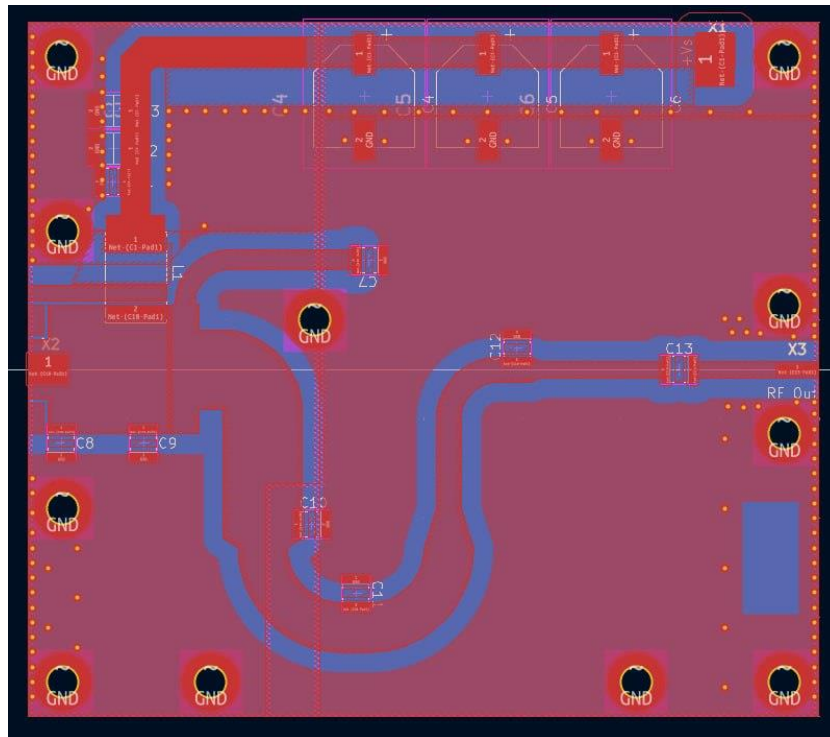


Рис. 3.10 — Друкована плата вихідного кола

3.3. Налагодження та кінцеві параметри підсилювача

Після припаювання транзистора до тепловідвідної пластини та завершення збірки всього передавача, було виконано налагодження підсилювача потужності. Основною метою налагодження було отримання необхідних параметрів узгодження підсилювача у всьому робочому діапазоні частот.

Налаштування здійснювалось шляхом коригування вхідного та вихідного кола підсилювача та підбору необхідних номіналів та відстаней між ємностями. У процесі налагодження контролювалась форма амплітудно-частотної характеристики та зворотні втрати по входу підсилювача. Особлива увага приділялась забезпеченню рівномірності АЧХ у діапазоні 700–1050 МГц та мінімізації нерівномірності підсилення на краях смуги.

Підсилювач після проведеного налагодження вхідного і вихідного кола, зображено на рис. 3.11.

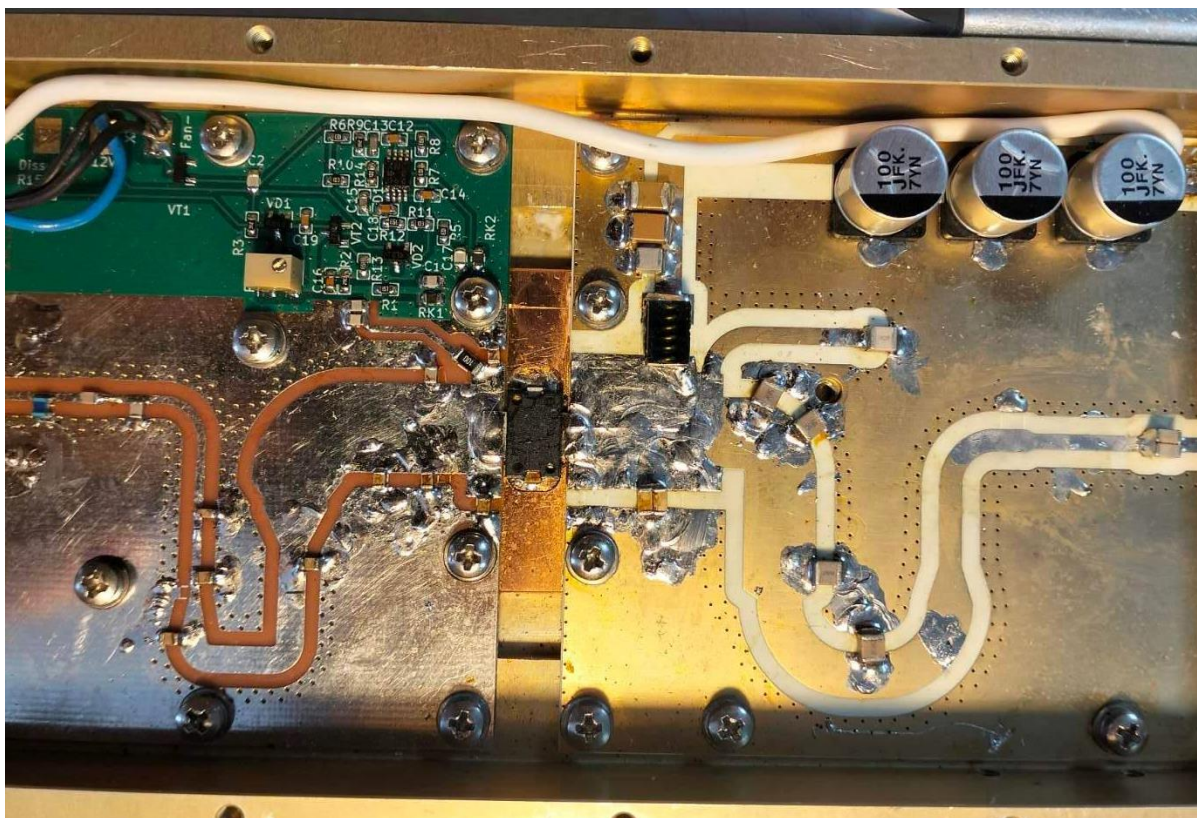


Рис. 3.11 — Налагоджений підсилювач

У результаті проведеного налагодження було отримано АЧХ підсилювача, зображену на рис. 3.12. До результатів вимірювань потрібно додати 30 дБ, оскільки вимірювання проводились з атенюатором по виходу підсилювача, при вхідній потужності з трекінг генератора 0 дБм. Отримана характеристика підтверджує працездатність розробленого підсилювача та відповідність його параметрів заданому діапазону частот.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

PI21.468732.001 ПЗ

Арк.

49

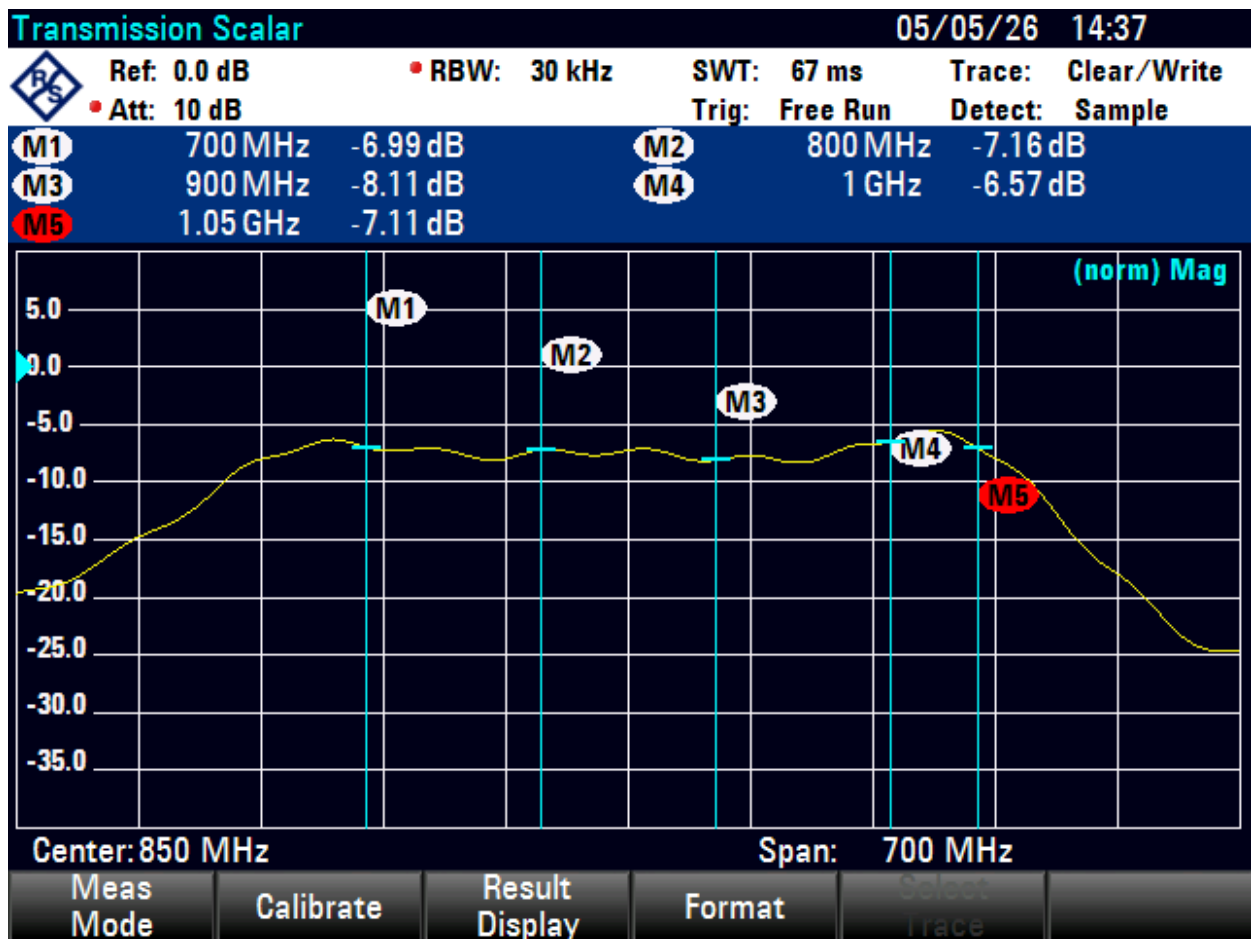


Рис. 3.12 — Малосигнальна АЧХ підсилювача

Після налагодження параметрів підсилювача необхідно внести корегування в конструкторську документацію схеми ЕП та переліку елементів плати вихідного кола. Плата вхідного кола в процесі налагодження значних покращень зворотніх втрат не отримала, тому її можна залишити в варіанті який було розраховано. Нова схема плати вихідного кола зображена на рис. 3.13.

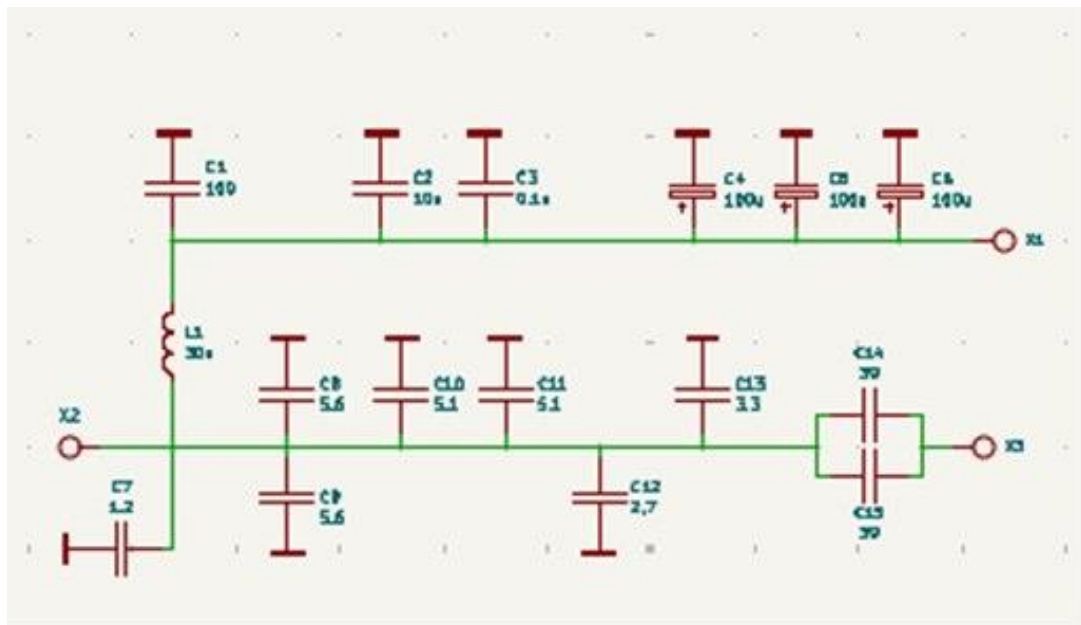


Рис. 3.13 — Нова схема ЕП плати вихідного кола

Також на рис. 3.14 зображено 3-D модель плати вихідного кола розроблену в ПЗ Autodesk Inventor. Розроблене складальне креслення наведено в додатку Г.

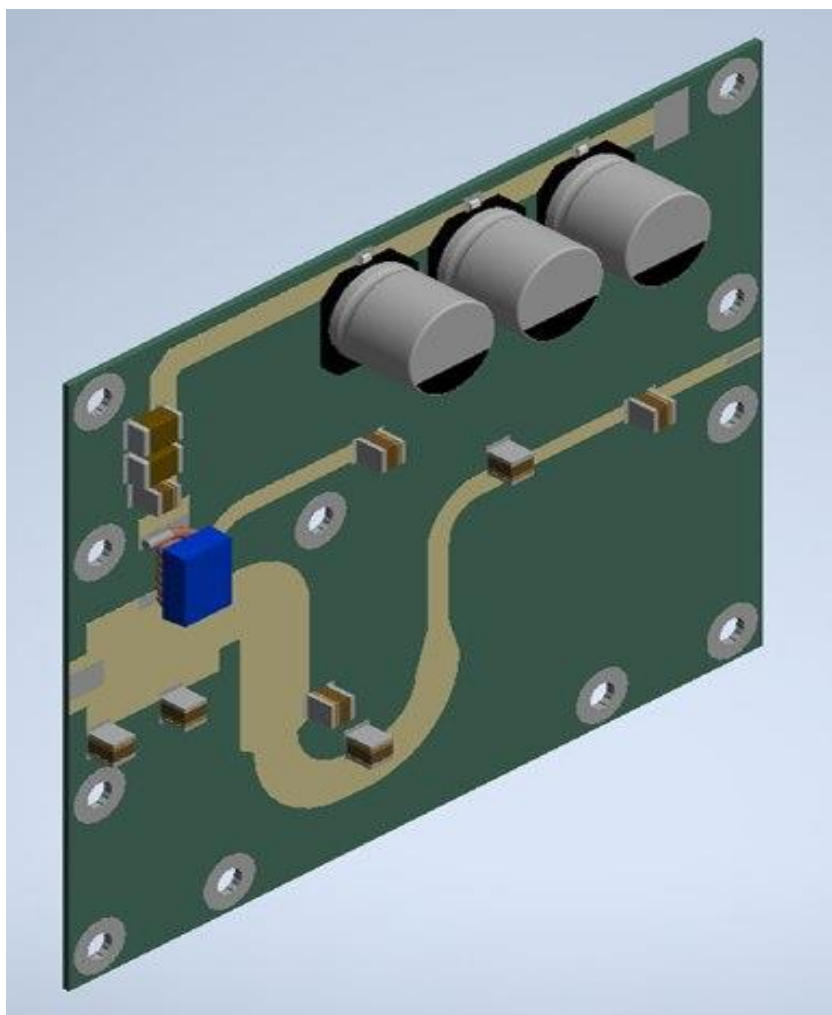


Рис. 3.14 — Плата вихідного кола

Результати вимірювань параметрів підсилювача в діапазоні 700-1050 МГц з кроком 50 МГц, показано в таблиці 3.

Параметри налагодженого підсилювача потужності

U = 40В;

	700	750	800	850	900	950	1000	1050
Рвих,Вт	136	118	112	114	123	128	116	108
Рвх,Вт	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
I, А	5,42	4,86	4,82	5,02	5,44	5,33	4,84	4,91
ККД, %	63	60,7	58,1	56,8	56,5	60	60,2	55
2 г., дБн	-26	-56	-49	-56	-56	-59	-56	-56
3 г., дБн	-58	-42	-45	-53	-48	-48	-49	-48

Виготовлений кінцевий варіант підсилювача зображений на рис. 3.15.

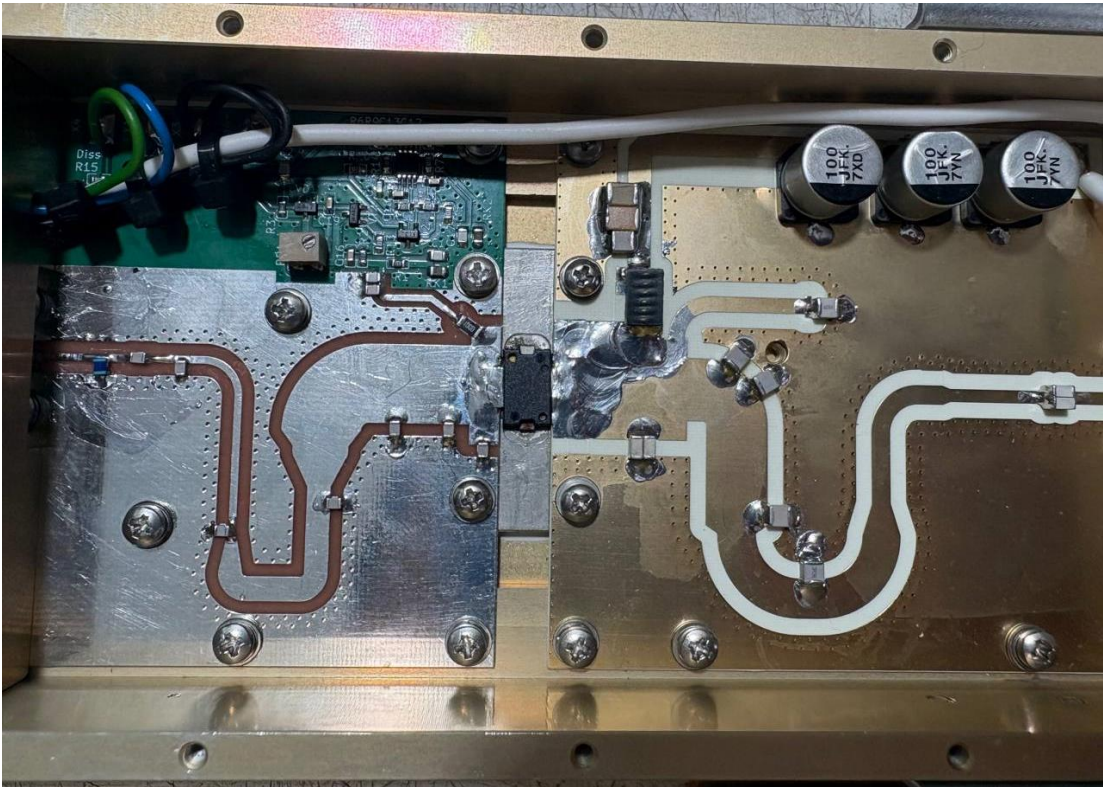


Рисунок 3.15 — Кінцевий варіант підсилювача 700- 1050 МГц

Максимальна температура на транзисторі, при роботі підсилювача на повній потужності при температурі навколишнього середовища 25°C тримається на рівні 72-77°C.

З отриманих результатів вимірювань можна зробити висновок, що розроблений підсилювач має хороші характеристики. У всьому робочому діапазоні частот забезпечується вихідна потужність не менше 100 Вт, при вхідній потужності 2,3 Вт.

Коефіцієнт корисної дії підсилювача знаходиться в межах 55–63 %, що є хорошим показником для підсилювача потужності для РЕБ, широкого діапазону частот.

Рівень другої та третьої гармонік також знаходиться на прийнятному рівні. Друга гармоніка має рівень до –26 дБн, а третя — до –42 дБн, що свідчить про достатню спектральну чистоту сигналу та хорошу лінійність роботи підсилювача. Низький рівень гармонічних складових підтверджує правильність вибору режиму роботи транзистора та ефективність вихідного узгоджувального кола.

Під час роботи підсилювач також продемонстрував задовільний тепловий режим. Завдяки використанню масивної тепловідвідної пластини та правильному монтажу транзистора температура елементів залишалась у допустимих межах, що забезпечує стабільність параметрів та надійну роботу пристрою при тривалому навантаженні. Загальний вигляд передавача, можна побачити на рис. 3.16.



Рис. 3.16 — Широкопasmовий передавач РЕБ

Після налагодження всіх параметрів проведено температурні випробування при температурі навколишнього середовища 45 °С. За таких умов використання потужність на виході не менше 104 Вт. Захист по температурі спрацьовує при температурі навколишнього середовища вище 52 °С

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було виконано розробку широкопasmового підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц на основі LDMOS транзистора BLP981. У процесі розробки було спроектовано вхідне та

вихідне кола підсилювача, реалізовано систему термокомпенсації струму спокою, автоматичне керування вентиляторами та аварійний температурний захист.

Розрахунок широкосмугових узгоджувальних кіл та друкованих трансформаторів виконувався у програмному середовищі AWR Design Environment, для розробки електричних принципових схем та друкованих плат використовувалось програмне забезпечення KiCad.

У процесі проектування було реалізовано конструкцію підсилювача з розділенням вхідного та вихідного кіл на окремі друковані плати. Для вхідного кола використано матеріал FR-4, а для вихідного Rogers RO4350.

Після виготовлення та налагодження підсилювача були отримані кінцеві характеристики пристрою. У всьому діапазоні 700–1050 МГц забезпечується вихідна потужність понад 100 Вт при вхідній потужності 2,3 Вт. Коефіцієнт корисної дії знаходиться у межах 55–63 %, що є хорошим показником для широкосмугового підсилювача потужності систем радіоелектронної боротьби.

Проведені температурні випробування показали, що навіть при тривалій роботі на максимальній потужності температура транзистора не перевищує допустимих значень, а реалізована система охолодження та температурного захисту забезпечує стабільну та надійну роботу пристрою.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломного проєкту було розроблено широкосмуговий підсилювач потужності діапазону 700–1050 МГц для використання у складі передавальних комплексів радіоелектронної боротьби. У процесі роботи проведено аналіз сучасних підсилювачів потужності та технологій побудови широкосмугових ВЧ підсилювачів, визначено основні вимоги до параметрів розроблюваного пристрою та обґрунтовано вибір елементної бази.

У результаті аналізу аналогів встановлено, що для систем РЕБ важливими параметрами є не лише висока вихідна потужність та широкий діапазон частот, а й стійкість до роботи при неузгодженому навантаженні, ефективне охолодження. На основі проведеного аналізу для реалізації підсилювача було обрано LDMOS транзистор BLP981, який характеризується хорошою стійкістю до відбитої потужності та придатністю для роботи у широкосмугових високопотужних передавачах.

У роботі було розроблено вхідне та вихідне кола підсилювача, виконано розрахунок широкосмугових трансформаторів та узгоджувальних кіл у програмному середовищі AWR Design Environment. Для проектування електричних принципових схем та друкованих плат використовувалось програмне забезпечення KiCad. Також реалізовано систему термокомпенсації струму спокою транзистора, автоматичне керування вентиляторами охолодження та аварійний температурний захист.

Після виготовлення та налагодження підсилювача були отримані експериментальні результати, які підтвердили працездатність розробленого пристрою. У всьому робочому діапазоні частот 700–1050 МГц забезпечується

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вихідна потужність понад 100 Вт при вхідній потужності 2,3 Вт. Коефіцієнт корисної дії підсилювача знаходиться у межах 55–63 %, що є хорошим показником для широкосмугового підсилювача потужності систем радіоелектронної боротьби.

Проведені температурні випробування підтвердили ефективність реалізованої системи охолодження та температурного захисту. При тривалій роботі на максимальній потужності температура транзистора залишалась у допустимих межах, а система автоматичного керування вентиляторами забезпечувала стабільний тепловий режим роботи пристрою.

Таким чином, поставлена мета дипломного проєкту була досягнута. Розроблений підсилювач потужності може використовуватись у складі широкосмугових передавачів систем радіоелектронної боротьби з програмним керуванням робочими частотами та забезпечує необхідні технічні характеристики для роботи у діапазоні 700–1050 МГц.

					PI21.468732.001 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. David M. Pozar, Microwave Engineering: John Wiley & Sons, USA, 2005. 548-557.
5. A. Grebennikov, RF and Microwave Power Amplifier Design: McGraw-Hill, New York, 2004. 467-478.
2. Douglas Self, Audio Power Amplifier Design Handbook: Elsevier, USA, 2009. 31-33.
3. Inder J. Bahl, Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifiers: John Wiley & Sons, USA, 2009. 185-204.
4. N.O. Sokal, A.D. Sokal, "Class E – A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers", IEEE J. Solid State Circuits, vol. 10, pp. 168–176, June 1975.
5. Steve Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications: Artech house, Boston-London, 2006. 53-55.
6. Rfhic.com: веб-сайт. URL: https://rfhic.com/wp-content/uploads/2024/06/RWP15080-10_V1.8-100W-700-2500-MHz-GaN-Wideband-Amplifier.datasheet-download.pdf (дата звернення: 12.05.2026).
7. Rflambda.de: веб-сайт. URL: <https://www.rflambda.de/pdf/poweramplifier/RFLUPA0727GA.pdf> (дата звернення: 12.05.2026).
8. Tatusky.com: веб-сайт. URL: <https://tatusky.com/products/700-1000mhz-100w-gan-lora-rf-power-amplifier-gan-anti-fpv-with-digital-source-defense-module-anti-drone-system-autel-mavic-3-counter-fpv-c-uas-djis?> (дата звернення: 12.05.2026).

ДОДАТОК А
ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП РІ21.468732.001 ПЗ	Пояснювальна записка	59	
3	A3	ДП РІ21.468359.001 СК	Складальне креслення	1	
4	A3	ДП РІ21.468359.002 СК	Складальне креслення	1	
4	A3	ДП РІ21.468732.001 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
5	A4	ДП РІ21.468732.001 ПЕ	Перелік елементів	3	

				ДП РІ21.468359.001		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Степанищенко Є.В.				1	1
Керівн.	Козачук М.А.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. РІ Гр. РІ-21	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Літвінцев С.М.					

ДОДАТОК Б

ПОГОДЖЕНО

Керівник дипломного проєкту
к.т.н., ст. викл., Козачук М.А.

(дата)



(підпис)

ЗАТВЕРДЖЕНО

Завідувач кафедри радіоінженерії
к.т.н, доцент, Літвінцев С.М.

(дата)

(підпис)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ
«Розробка підсилювача потужності діапазону 700 – 1050 МГц»

Київ 2026

1 НАЗВА І ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ

Назва дипломного проекту «Підсилювач потужності діапазону 700 – 1050 МГц».

Підставою для виконання є завдання, видане кафедрою радіоінженерії від «__» _____ 2026 р.

2 ВИКОНАВЕЦЬ

Виконавець — студент групи РІ-21 Степанищенко Євген Вадимович.

3 МЕТА ВИКОНАННЯ ДП І ПРИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКЦІЇ

Мета дипломного проекту — розробка широкосмугового підсилювача потужності діапазону 700–1050 МГц для систем радіоелектронної боротьби з вихідною потужністю понад 100 Вт.

4 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

4.1 Призначення

Підсилення високочастотних сигналів у діапазоні 700–1050 МГц у складі передавальних комплексів радіоелектронної боротьби з програмним керуванням робочими частотами.

Кліматичні вимоги згідно ДСТУ 8280:2015.

Захист від механічних впливів Н7 згідно ГОСТ 16019-2001.

4.2 Надійності

Підсилювач повинен забезпечувати стабільну роботу у всьому робочому діапазоні частот при тривалих режимах випромінювання. Конструкція пристрою повинна забезпечувати ефективне охолодження вихідного транзистора та захист від перегріву. Елементи конструкції мають бути стійкими до механічних впливів та вібрацій під час транспортування й експлуатації. Система охолодження та високочастотні з'єднання повинні забезпечувати надійну роботу пристрою у польових умовах.

4.3 Конструкції

Ширина плати підсилювача: не більше 100 мм.

Висота плати підсилювача: не більше 25 мм.

Довжина плати підсилювача: не більше 200 мм.

Маса передавача: не більше 2.5 кг.

4.4 Уніфікації і стандартизації

Використовувати уніфіковану конструкцію.

4.5 Дизайну, ергономіки та технічної естетики

Ширина корпусу передавача: 122 мм.

Висота корпусу передавача: 66 мм.

Довжина корпусу передавача: 271 мм.

4.6 Експлуатації, зручності технічного обслуговування та ремонту

Технічний огляд необхідно проводити перед кожним використанням комплексу, при цьому перевіряються надійність високочастотних та силових з'єднань, стан системи охолодження та відсутність механічних пошкоджень. Періодичне технічне обслуговування рекомендується проводити через кожні 200 годин роботи, включаючи контроль параметрів підсилювача та калібрування системи керування.

4.7 Безпеки для життя, здоров'я і майна громадян

Керуватися положеннями стандартів про вимоги технічної безпеки, електробезпеки, пожежної безпеки.

4.8 Транспортування і зберігання

Під час транспортування передавач повинен бути надійно закріплений та захищений від ударів, вібрацій і механічних пошкоджень за допомогою захисного кейса або м'яких підкладок. Також необхідно уникати впливу вологи, пилу та сильних електромагнітних завад.

4.9 Якості технічного рівня

Відповідає світовому рівню.

5 ВИМОГИ ДО СИРОВИНИ, МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ КОРПУСУ

Для виготовлення корпусу передавача доцільно використовувати алюмінієві сплави та композитні матеріали, які поєднують високу механічну міцність, невелику масу та хороші тепловідвідні властивості.

6 ВИМОГИ ДО КОНСЕРВАЦІЇ, ПАКУВАННЯ І МАРКУВАННЯ

Маркування: обов'язково нанести децимальний та серійний номер на бічний панелі, логотип та назву компанії виробника не наносити.

Пакування: передавач повинен транспортуватися у захисному кейсі з використанням пінопластових вставок, м'яких підкладок або захисних чохлів.

Консервація: не передбачено.

7 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Оформлення документації згідно ДСТУ 3008:2015. Склад конструкторської документації:

1. Текстова документація (пояснювальна записка, специфікація).
2. Графічна документація загальним (Складальне креслення, загальний вигляд 3-D моделі плат вхідного і вихідного кола, зображення виготовленого підсилювача).

7.1 Орієнтовний зміст дипломного проекту:

Завдання на дипломний проект; Зміст; ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ; ВСТУП; 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ; 2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ ПІДСИЛЮВАЧІВ ПОТУЖНОСТІ; 3 РОЗРОБКА ПІДСИЛЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ ДІАПАЗОНУ 700–1050 МГц; ВИСНОВКИ; Додаток А; Додаток Б; Додаток В;

8 СТАДІЇ І ЕТАПИ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Робота виконується в 8 етапів.

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Форма звітності
1	Огляд літератури	27.04 – 04.05	Розділ 1
2	Огляд елементної бази	04.05 – 06.05	Розділ 1
3	Ознайомлення із середовищем AWR, KiCad	06.05 – 11.05	Розділ 1

4	Дослідження аналогів	11.05 – 13.05	Розділ 2
5	Побудова моделей, створення креслень	13.05 – 18.05	Розділ 3, СК, ЕП
6	Налагодження дослідного зразка, вимірювання параметрів	18.05 – 25.05	Розділ 3
7	Написання та оформлення пояснювальної записки дипломного проєкту	25.05 – 29.05	Розділ 1, Розділ 2, Розділ 3
8	Оформлення висновків	30.05 – 31.05	Розділ 3

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

1. Представлення проміжних результатів дипломного проєкту керівнику;
2. Представлення завершеного дипломного проєкту керівнику;
3. Перевірка дипломного проєкту на наявність плагіату;
4. Представлення кафедрі завершеного дипломного проєкту;
5. Захист дипломного проєкту перед екзаменаційною комісією.

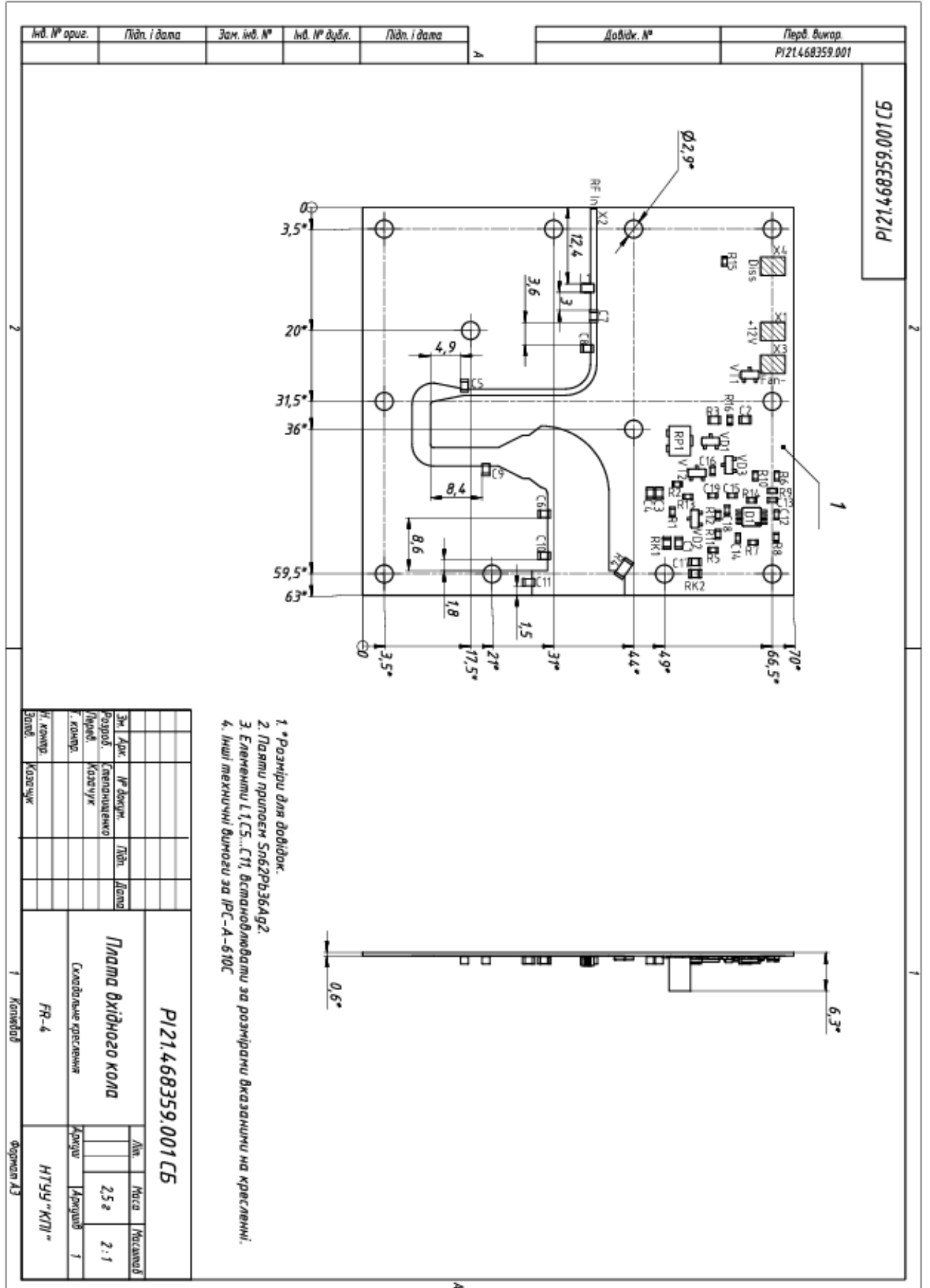
Виконавець

Степанищенко Є.В. 

Керівник

к.т.н., ст. викл. Козачук М.А. 

ДОДАТОК В



ДОДАТОК Г

ДОДАТОК Д

Перв. викор. Р?21.468732.001	Поз. позначення	Найменування	Кіл.	Примітки	
	VT1	Транзистор BLP981 Ampleon	1	TO-270-2F-1	
Довідк. №	A1	Плата вхідного кола PI21.468359.001	1		
		Конденсатори			
	C1...3	0805 NP0 50 В 1 нФ ±5%	3		
	C4	0805 NP0 200 В 100 пФ 5%, Kyocera	1		
	C5	0805 COG 250 В (5,6±0,25) пФ, Johanson	1		
	C6	0805 COG 250 В 12 пФ 5%, Johanson	1		
	C7	0805 COG 250 В 10 пФ 5%, Johanson	1		
	C8	0805 COG 250 В (4,7±0,25) пФ, Johanson	1		
	C9	0805 COG 250 В (9,1±0,25) пФ, Johanson	1		
	C10	0805 COG 250 В 15 пФ 5%, Johanson	1		
Підп. і дата	C11	0805 COG 250 В (9,1±0,25) пФ, Johanson	1		
	C12...16	0603 X7R 50 В 10 нФ 10%	5		
	C17	0805 NP0 50 В 1 нФ ±5%	1		
	C18...19	0603 X7R 50 В 10 нФ 10%	2		
	D1	Мікросхема LM2903DGKR, Texas Instruments	1		
	L1	Індуктивність SMD 0805 8,2 нГн 5%, MURATA	1		
	Зам. ітв. №				
Підп. і дата					
Інв. № ориг.	Розроб.	Степанищенко			
	Перев.	Козачук			
	Н.контр.				
	Затв.	Козачук			
PI21.468732.001 ПЕЗ					
Модуль підсилювача 100 Вт 700...1050 МГц				Літ.	
Перелік елементів				Аркуш	
				Аркушів	
				1	
				3	
				НТУУ"КПІ"	

Поз. позна- чення	Найменування	Кіл.	Примітки
	<u>Резистори</u>		
R1	0603 15 кОм 5%	1	
R2	0603 3,6 кОм 5%	1	
R3	0805 4,7 кОм 5%	1	
R4	1206 100 Ом 5%	1	
R5...R7	0603 10 кОм 5%	3	
R8	0603 39 кОм 5%	1	
R9	0603 3,6 кОм 5%	1	
R10, 11	0603 10 кОм 5%	2	
R12, 13	0603 39 кОм 5%	2	
R14	0603 1,8 кОм 5%	1	
R15	0603 39 кОм 5%	1	
RK1,2	Терморезистор 0805 10 кОм 5%, MURATA	2	NCP21XV103J03
RP1	Потенціометр PVG5A 0,25Вт 5 кОм 10%	1	
VD1	Стабілітрон BZX84-C4V7, Nexperia	1	SOT-23
VD2	Діод BAT-54C, Nexperia	1	SOT-23
VT1,2	Транзистор IRLML0030, INFINEON	2	SOT-23
X1...X4	Друкований елемент	4	
W1...10	Мікросмужкова лінія конструктивна	10	

Змін. Арк. № докум Підп. Дата
 Інк. № ориф. Пдп. і дата Зам. Інв. № Інк. № дубл. Пдп. і дата

PI21.468732.001 ПЕЗ

Арк. 2

