

## КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ

Бакалавр

Освітній рівень

Високочастотний субмодуль багатоелементної антени

Назва теми

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр КПТР 2018002.01.14.00ПЗ

Виконав: здобувач 4 курсу, група ТР1-18-1



Підпис

П.В. Іонов

Ініціали, прізвище

Керівник:.



1.06.22

Підпис, дата

О.С. Пивовар

Ініціали, прізвище

Нормоконтроль:



3.06.22

Підпис, дата

В.І. Стецюк

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав.кафедри телекомунікацій,  
медійних та інтелектуальних  
технологій



06.06.22

Підпис, дата

С.К. Підченко

Ініціали, прізвище

\_\_\_06\_\_\_ червня \_\_\_2022 р.

Хмельницький 2022

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ)

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Шифр і назва

Освітня-професійна програма «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТМІТ



3.03.22

Підпис, дата

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ**

Іонову Павлу Вадимовичу

Прізвище, ім'я, по батькові здобувача

1 Тема проєкту Високочастотний субмодуль багатоелементної антени,

керівник проєкту Пивовар Олег Сергійович, к.т.н, доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від « 1 » березня 2022р. № 18.

2 Строк подання студентом проєкту на кафедру: 20.05.2022р.

3 Вихідні дані до проєкту Ескіз та загальні принципи побудови схеми

високочастотного активного субмодуля фазованої антенної решітки дециметрового діапазону, умови застосування – визначаються модулем верхнього структурного рівня. Вихідний та вхідний опір модуля 50 Ом, вихідна потужність 25Вт, коефіцієнт корисної дії не менше 30%, центральна частота – близько 1ГГц. Технологія виготовлення – печатна плата із мікросмужковими елементами. Напруга живлення – 26В постійного струму. Загальна маса – до 3кг.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Техніко-економічне обґрунтування побудови активних модулів фазування багатоелементних антен та розробка технічного завдання. Аналіз принципів роботи активних фазованих решіток та взаємодія модулів. Конструкторські та електричні розрахунки фазообертача, подільника потужностей та ультрависокочастотного підсилювача, оцінювання надійності виробу.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Схема електрична структурна. 2. Схема електрична функціональна. 3. Схема електрична принципова. 4. Креслення або демонстраційний плакат.

## 6 Консультанти розділів кваліфікаційного проєкту

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

7 Дата видачі завдання 3.03.2022р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Вибір тематики	до 1.03.22	обрано
2	Аналіз початкових даних	до 5.03.22	виконано
3	Написання вступу та 1 розділу	до 15.03.22	виконано
4	Написання 2 розділу	до 15.04.22	виконано
5	Оформлення креслення структурної та функціональної схеми	до 15.04.22	виконано
6	Написання 3 розділу	до 1.05.22	виконано
7	Оформлення креслення принципової схеми та демонстраційних плакатів	до 10.05.22	виконано
8	Компоновка та формування висновків	до 15.05.22	виконано
9	Корекція зауважень керівника	до 17.05.22	виконано
10	Підготовка доповіді, оформлення документів супровіду	до 18.05.22	виконано
11	Подання готової роботи на попередній захист	20.05.22	виконано
12	Корекція зауважень під час попереднього захисту	до 01.06.22	виконано
13	Рецензування, антиплагіат, підписи	до 06.06.22	виконано

Здобувач



Підпис

П.В. Іонов

Ініціали, прізвище

Керівник проєкту



Підпис

О.С. Пивовар

Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проекту:

«Високочастотний субмодуль багатоеlementної антени».

Автор проекту: Іонов Павло Вадимович.

Керівник проекту: канд. техн. наук, доц. Пивовар Олег Сергійович.

Пояснювальна записка: 57 сторінок, 23 рисунки, 7 таблиць, 24 джерела, 1 додаток.

Графічна частина: 4 креслення, 10 презентаційних слайдів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** АНТЕННА РЕШІТКА, ДИСКРЕТНИЙ ФАЗООБЕРТАЧ, ПІДСИЛЮВАЧ ПОТУЖНОСТІ, МІКРОСМУЖКОВА ЛІНІЯ.

*Метою кваліфікаційного проекту* є розробка високочастотного модуля у складі передавальних фазованих антенних решіток діапазону ультрависоких частот.

Кваліфікаційний проект присвячений розгляду окремих питань побудови передавального субмодуля активних фазованих антенних решіток. Проведено розгляд та аналіз структури антенних решіток, виділено переваги та недоліки антенних решіток різних класів та видів. Сформовано технічне завдання для розробки передавального субмодуля. На основі розгляду технічних рішень та принципів роботи аналогів сформовано технічне завдання на розробку сейсмометричної системи охорони периметру. Виділено та проаналізовано можливості реалізації фазообертачів та підсилювачів ультрависоких частот в складі субмодуля та проведено технічні розрахунки їх показників. Розроблено структурну, функціональну та принципову схему субмодуля, проведено оцінку надійності його роботи у складі комплексу.

П.В. Іонов

Ініціали, прізвище здобувача



25.05.22

Підпис, дата

№рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	№ екземпл.	Примітка
1						
2			<u>Документація загальна</u>			
3						
4	A4		Завдання на дипломний			
5			проект	1		
6	A4		Календарний план	1		
7	A4		Анотація	1		
8	A4	КПТР2018002.01.14.00ПЗ	Пояснювальна записка	65		
9	A4		Копії креслень	2		із форм.А1
10	A4		Копії довідок антиплагіату	1		
11	A4		Рішення каф. про допуск	1		
12	A4		Копія відгуку рецензента	1		
13	A4		Копія відгуку керівника	1		
14	A4		Копія заяви про академічну			
15			добросесність	1		
16						
17			<u>Документація графічна</u>			
18						
19	A3	КПТР2018002.01.14.00Е1	Схема електрична структурна	1		
20	A2	КПТР2018002.01.14.00Е2	Схема електрична функціональна	1		
21	A1	КПТР2018002.01.14.00Е3	Схема електрична принципова	1		
22	A3	КПТР2018002.01.14.00Т2	Топологічна схема	1		
23			Демонстраційні плакати	10		
24						
25						
26						
27						

					<b>КПТР 2018002.01.14.00ВП</b>		
Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			
Розробив		Іонов П.В.			Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Пивовар О.С.					
Н.контр.					<b>ХНУ, ФІТ</b>		
Затверд.		Підченко С.К.					
					<b>Високочастотний субмодуль багатоелементної антени</b> Відомість проекту		

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	8
ВСТУП.....	9
1 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗРОБКИ .....	11
1.1 Антенні решітки в антенних системах.....	11
1.1.1 Поняття антенної решітки .....	11
1.1.2 Багатопелюсткові антенні решітки.....	13
1.2 Фазовані антенні решітки.....	14
1.2.1 Поняття фазованої антенної решітки .....	14
1.2.2 Класифікація та застосування фазованих антенних решіток.....	18
1.3 Розробка технічного завдання на виріб.....	21
1.3.1 Склад виробу, конструкція та призначення.....	21
1.3.2 Технічні характеристики пристрою.....	23
1.3.3 Конструкторські та технологічні вимоги.....	24
2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ.....	25
2.1 Активні фазовані решітки та керування променем .....	25
2.1.1 Активні фазовані антенні решітки.....	25
2.1.2 Керування фазовими зсувами опромінювачів ФАР .....	26
2.1.3 Вимоги і параметри фазообертачів для антенних решіток .....	28
2.2 Модулі фазованих решіток та їх складові .....	30
2.2.1 Проектування модулів активних фазованих решіток.....	30
2.2.2 Конструкторське виконання фазообертачів .....	32
2.2.3 Аналіз та вибір схеми керування фазовим зсувом.....	33
2.2.4 Підсилювач потужності та його елементна база.....	35
2.2.5 Перспективність та напрямки удосконалення ФАР .....	37

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ							
Вип.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	<b>Високочастотний субмодуль багатоелементної антени</b> <small>Пояснювальна записка</small>			Літера	Аркуш	Аркушів		
Розробив	Іонов П.В.									6	65	
Перевірив	Пивовар											
Н. контр.	Стецюк							ХНУ, ФІТ				
Затв.	Підченко											

-	
3	РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ .....39
3.1	Розробка ультрависокочастотного фазообертача .....39
3.1.1	Вихідні дані та вибір матеріалу .....39
3.1.2	Розрахунок топології фазозсувних ланок .....42
3.2	Розрахунок підсилювача потужності .....46
3.2.1	Особливості роботи активних елементів на високих частотах .....46
3.2.2	Високочастотна модель силового елемента .....48
3.2.3	Схемотехнічний розрахунок підсилювача модуля .....50
3.3	Подільник потужності турнікетної антени .....54
3.4	Оцінювання надійності виробу .....58
	ВИСНОВКИ .....62
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....63
	ДОДАТОК А .....65

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АР – антенна решітка  
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика  
АЕЛ – активний елемент радіоелектронного пристрою  
АФАР – активна фазована антенна решітка  
АФТ – антенно-фідерний тракт  
БПЛ – бокова пелюстка антени  
ГЗЗ – генератор із зовнішнім збудженням  
ДСП – діаграма спрямованості антени  
ЕВБ – елементарний вібратор антенної решітки  
ЕМП – електромагнітне поле  
ЕМХ – електромагнітна хвиля  
ЕМЕ – електромагнітна енергія  
ККД – коефіцієнт корисної дії  
КСД – коефіцієнт спрямованої дії антени  
КПА – – коефіцієнт підсилення антени  
МЛП – мікросмужкова лінія передачі  
МСР – мікросмужковий резонатор  
НВЧ – надвисокі частоти (3-30ГГц)  
УВЧ – ультрависокі частоти (0,3-30ГГц)  
ПЕЛ – пасивний елемент радіоелектронного пристрою  
ТЗ – технічне завдання на розробку виробу  
ФО – фазообертач (високочастотний)  
ФАР – фазована антенна решітка  
ФЧХ – фазо-частотна характеристика

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

## ВСТУП

Спрямовані властивості простих антен, апертура яких співмірна із довжиною хвилі невисока. Найбільш поширеним прикладом простих антен є симетричний напівхвильовий вібратор. Просте збільшення апертури вібратора загалом не приводить до суттєвого покращання спрямованих властивостей, але застосування системи вібраторів, що збуджуються одним джерелом сигналу та налаштованих відповідним чином, дозволяє ефективно це зробити. Побудовану таким чином антенну систему називають антенною решіткою (АР) [1].

Натепер АР різних видів та класів переважають як в техніці радіозв'язку, так і для виконання інших завдань обробки інформації: радіолокації, радіонавігації, радіоелектронної розвідки, тощо. Антенну решітку можливо побудувати не тільки із слабо спрямованих простих антен, таких як тонкі вібратори, щілинні структури, відкриті кінці металевих та діелектричних хвилеводів, тощо, так і високоспрямованих структур дзеркальних, рупорних, складних діелектричних, планарних, вбудованих тощо [2].

Із теоретичної точки зору застосування АР дозволяє збільшити спрямовані властивості в кількість разів, що дорівнює кількості простих антен у складі АР, що дозволяє підвищити потужність сигналу в точці прийому, забезпечивши мінімізацію загальних енергетичних витрат радіолінії. Такий факт повністю відповідає загальним висновкам енергетики радіосистем, що визначають переважальний факт впливу параметрів та характеристик антенної системи для забезпечення дальності дії радіолінії передавання, вилучення та добування інформації [1-3].

Але переваги АР проявляються не тільки в збільшенні таких спрямованих властивостей як коефіцієнт спрямованої дії (КСД), але і у забезпеченні можливості слабоінерційного сканування простору через використання електричного сканування простору або електричного керування напрямком головної пелюстки або навіть формування декількох пелюсток в своїй зоні дії

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

забезпечуючи ряд незалежних каналів обробки інформації за допомогою однієї АР. Такі широкі можливості керування спрямованістю дії підвищують завадостійкість випромінюючих та приймаючих засобів через можливість адаптації до рівня радіотехнічних завад як ненавмисного так і навмисного характеру в рамках радіоелектронної протидії [1].

Крім того, за допомогою АР вдається суттєво збільшити електричну міцність конструкції антени і в результаті збільшити рівень випромінюваної енергії через використання багатоканальної схеми випромінювання для формування заданого фазового фронту, що дає більш широкі можливості і для потужних випромінюваних засобів, в першу чергу радіолокаторів [4,5].

Складні антени також розширюють функціональність радіотехнічної системи загалом через комплексність застосування АР яка об'єднує велику кількість функцій – радіолокацію, радіонавігацію, зв'язок, радіоелектронну протидію, тощо в різних частотних діапазонах.

Із розвитком процесорної техніки, керуванням променем або променями антенних решіток покладають на програмно-апаратні комплекси цифрових систем обробки, що обумовило появу цифрових програмованих антенних решіток, що є більш гнучкими в сучасних умовах використання, через наявність потужного програмного забезпечення [6-7].

Через велику кількість складових антен в АР керування такими решітками ускладнюється, кількість модулів також збільшується, тому розумно, щоб модулі були типовими – серійного виробництва, що забезпечить покращення надійності та мінімізацію вартості такої складної конструкції. Тому ретельна розробка модулів для АР є актуальним завданням на сьогодні.

**Метою кваліфікаційного проєкту** є розробка високочастотного модуля у складі передавальних фазованих антенних решіток діапазону ультрависоких частот.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

# 1 ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗРОБКИ

## 1.1 Антенні решітки в антенних системах

### 1.1.1 Поняття антенної решітки

Під час практичного застосування крім тактичних переваг у АР є ряд конструктивно-технологічних позитивних рішень як для бортових так і наземних радіоелектронних пристроїв порівняно із іншими антенами. Наприклад, зменшення масо-габаритних показників бортової апаратури реалізується через застосування точних масових технологій друкованого монтажу із вбудованими активними та пасивними елементами керування АР (рис.1.1) [1-7].

Загалом усі АР класифікуються по ряду основних ознак [8,9]:

- 1) загальна геометрія просторового розташування елементарних випромінювачів;
- 2) спосіб збудження елементарних випромінювачів;
- 3) закономірність розташування елементів у решітці;
- 4) принципи первинної обробки сигналів в решітці;
- 5) закономірностям фазового та амплітудного розподілу струмів збудження.

Із точки зору загальної геометрії, зменшення рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості (ДСП) мають бути використані решітки із рівномірним розподілом елементарних опромінювачів - еквідистанційні решітки. При чому центральні опромінювачі мають мати більш великі струми збудження, а переферійні – менші [10].

Також мінімізацію рівня бічних пелюсток забезпечують рівноамплітудні АР геометрія яких побудована таким чином, що б відстань між опромінювачами збільшувалась із віддаленістю опромінювача від центра АР. За умови

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

фіксованої апертури останній тип АР найбільший КСД. Для інших різновидів АР мінімізація рівня бічних пелюсток зменшує КСД або вимагає збільшення апертури АР загалом.

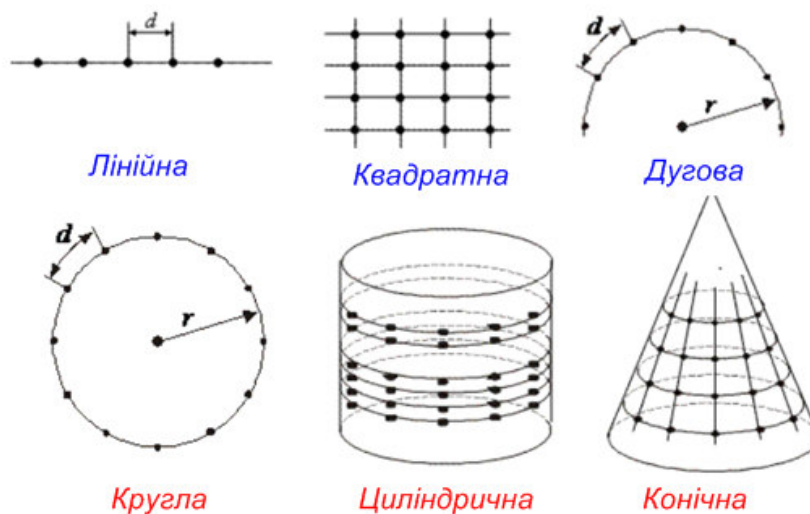


Рисунок 1.1 – Типові геометрії антенних решіток

Радіочастотне живлення опромінювачів АР переважно реалізується за допомогою послідовного обходу опромінювачів або рівнобіжного підключення. Під час послідовного живлення опромінювачів, кожен елемент збуджується високочастотним струмом один за одним, а під час рівнобіжного – незалежно. Останній спосіб ускладнює антенно-фідерний тракт (АФТ) через необхідність підведення електромагнітної енергії до кожного опромінювача окремо [11].

Але можливий і радіочастотний спосіб живлення, що в антенній техніці називають просторовим, або квазіоптичним, або ефірним, де потужний не спрямований опромінювач створює в зоні вторинних опромінювачів рівномірне електромагнітне поле (ЕМП). Під час останнього способу реалізується схема подвійного перевипромінювання, а опромінювач із активними елементами виступає в якості мінітранспондера в складі АР [12,13].

Якщо апертура АР занадто велика, то використання якогось одного способу живлення спряжено із значним зменшенням коефіцієнту корисної дії (ККД), тому в такому випадку використовують комбіновані способи живлення (послідовно – рівнобіжне збудження), що поділяє велику АР на менші АР, або

модулі менших розмірів. Також спрощується керування такою ієрархічною схемою побудови АР. Найбільш популярна структура живлення опромінювачів АР типу "ялинка", що утвориться на базі дихотомічного рівномірного процесу поділу електромагнітної енергії на дві рівні частини. Така схема мінімізує як довжину фідерів так і кількість вузлових солітерів потужності [13].

### 1.1.2 Багатопелюсткові антенні решітки

Як вже вказувалось, АР можуть формувати не тільки одну, але і декілька основних пелюсток ДСП (рис.1.2). Керування спрямуванням пелюсток в заданому напрямку залежить від розподілу поля випромінювання в АР. Якщо керування реалізується таким чином, щоб спрямування різних пелюсток було незалежне, тобто формується задана кількість незалежних променів, то такі АР називають багатопроменевими [11].

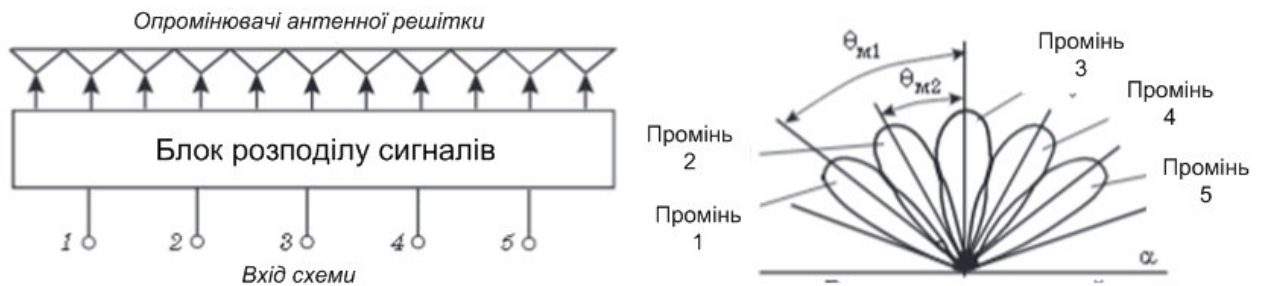


Рисунок 1.2 – Принцип роботи багатопроменевої антенної решітки

Базова структура багатопроменевої АР (рис.1.2) має у складі:

- 1) решітку опромінювачів певної геометрії;
- 2) блок розподілу сигналів або схема керування напрямком променя (матриця керування);
- 3) кількість входів, що дорівнює кількості променів.

Багатопроменева АР працює наступним чином: нехай блок розподілу сигналів має 5 незалежних входів, на який надходять високочастотні сигнали із однаковою амплітудою (потужністю). Для забезпечення формування променів в

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

різних напрямках фазовий розподіл на входах опромінювачів має залишатися лінійним від опромінювача до опромінювача (максимізація спрямованих властивостей) та змінюватися під час перемикання від променя 1 до променя 5 змінюючи кут нахилу залежності. В такому випадку кожен вхід блоку розподілу сигналів буде відповідати за власну лінійну залежність зсуву фаз суміжних випромінювачів і формувати тільки йому властивий напрямок максимального випромінювання (максимум головної пелюстки ДСП) .

Якщо за допомогою багатопроменевої АР необхідно реалізувати сканування певної ділянки простору, опромінювані та блок розподілу сигналів розраховують так, щоб ДСП головних пелюсток, що відповідають кожному входу перекривалась на рівні половинної потужності (або на рівні, за яким визначають ширину діаграми спрямованості). Оскільки входи такої скануючої АР є ортогональними (незалежними, без перехресного електромагнітного впливу) то можливо кожний вхід використовувати для передачі або прийому сигналу в даному напрямку (із заданого напрямку) одночасно по всім входам. [9].

В переважній більшості випадків багатопроменевої АР мають циліндричну, або кулеподібну форму (див.рис.1.1), що дає можливість сканувати в діапазоні кутів 360градусів за азимутом [7]. Живлення опромінювачів багатопроміневих АР також може бути послідовним, паралельним, комбінованим, просторовим, тощо. В спеціалізованих випадках багатопроменевої АР використовують у не спрямованих антенних системах, наприклад, в телевізійних передавачах.

## 1.2 Фазовані антенні решітки

### 1.2.1 Поняття фазованої антенної решітки

У фідерах живлення АР часто саме і проводиться обробка сигналу для формування заданого розподілу ЕМЕ в площині розкриття АР, для формування

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

однопелюсткової або багатопелюсткової ДСП (рис.1.3). Найбільш просто та швидко можливо реалізувати саме зміну фазового розподілу живлячих струмів елементарних опромінювачів через систему фазообертачів, що призводить до керування напрямком головної пелюстки ДСП. Такий різновид АР є найбільш поширеним у застосуванні та називається фазованими (фазовими, фазуючими) антенними решітками (ФАР) [1].

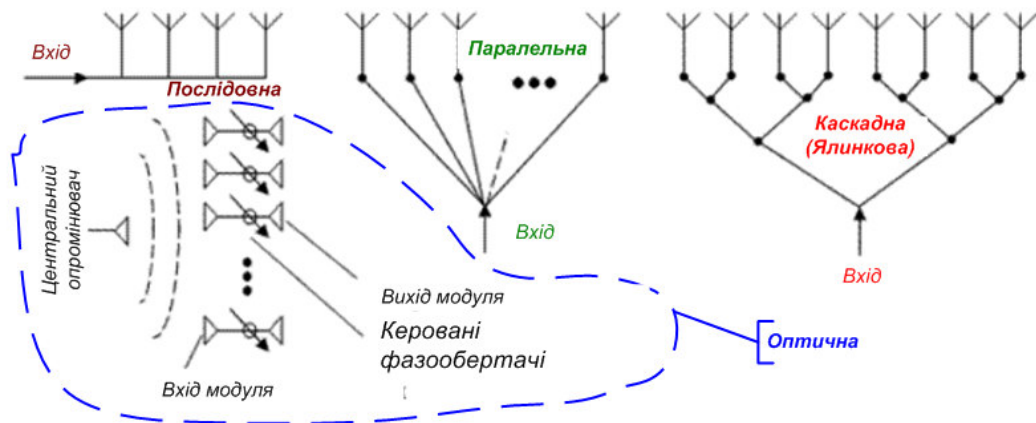


Рисунок 1.3 – Схеми живлення опромінювачів антенних решіток

Завдяки потужним технологічним ривкам у мікроелектроніці, кожен опромінювач можливо розглядати як окремий мініатюрний модуль у складі якого може бути підсилювач потужності випромінюваного сигналу, а також інші елементи, фазообертач, керовані фільтри, перетворювач частот, модулятор тощо. Такі ФАР, устатковані, в першу чергу підсилювачем потужності, називають активними фазованими антенними решітками (АФАР) .

На відміну від простих антен існує суттєва різниця між приймальними та передавальними АР [4]. Поширені приймальні АФАР із автоматично регульованим амплітудно-фазовим розподілом ЕМЕ між опромінювачами залежно від навколишньої електромагнітної ситуації називаються адаптивними, а приймальні АР із застосуванням методів когерентної оптики під час первинної обробки радіосигналів прийнято називати радіооптичними. Приймальні АР із широким застосуванням спеціалізованих швидкісних процесорів та методів

цифрової обробки називають цифровими антенними решітками (ЦАР). Також поширені суміщені або сполучені приймальні АР, де приймання проводиться в різних діапазонах різними частинами ФАР[9].

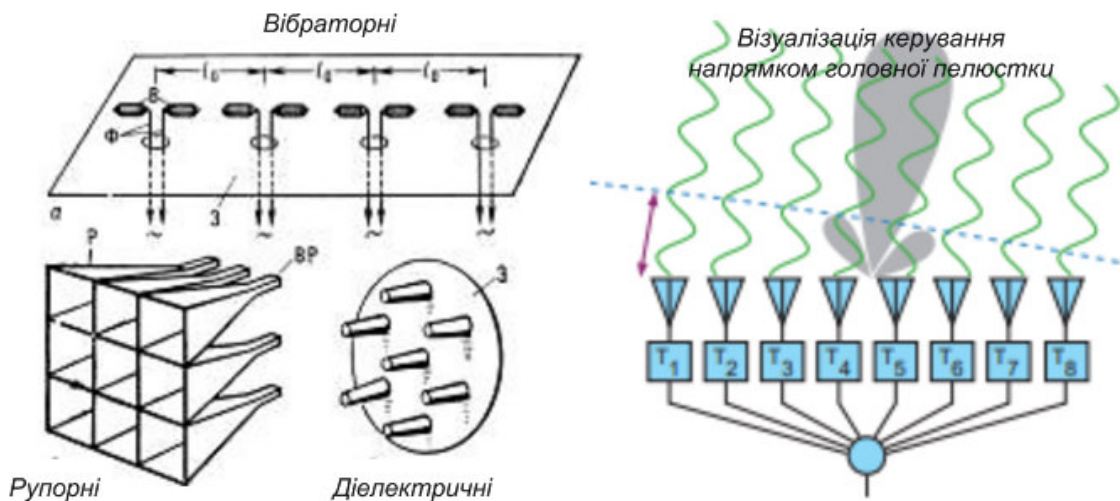


Рисунок 1.4 – Типи опромінювачів фазованих антенних решіток та візуалізація керування напрямком випромінювання

Залежно від розподілу потужності ЕМЕ, що живить опромінювані, ФАР поділяють на АР із рівномірним, експоненційно спадаючим та симетрично спадаючим розподілом потужності відносно геометричного центру АР. У випадку лінійної зміни фази струмів від опромінювача до опромінювача такі решітки мають назву ФАР із лінійним фазовим розподілом (рис.1.5).

До ФАР також відносять і синфазні АР, що переважно застосовують для підвищення спрямованих властивостей широкосмугових антен радіорелейних станцій (РРЛ), а також широкомовних пристроїв телебачення та радіозв'язку. Ширина ДСП синфазної АР покращується із зменшенням робочої довжини хвилі, збільшенням кількості опромінювачів та відстані між ними [10,11]. Також в синфазній АР із зменшенням кількості опромінювачів ширина головної пелюстки ДСП лишається практично незмінною, але зростає рівень бокових пелюсток. Зазвичай відстані між вібраторами в синфазних АР складають половину довжини хвилі (рис.1.4).

Особливу роль в сучасних динамічних радіоелектронних пристроях відіграє широкосмуговість антенної системи. Це стало актуальним тому, що в телекомунікаціях практично всі сучасні використовувані сигнально кодові конструкції є принципово широкосмуговими. Для покращення амплітудно-частотних (АЧХ) та фазочастотних (ФЧХ) характеристик АР застосовують змінно - фазові ФАР. В порівнянні із синфазними ФАР такі АР мають переваги в сенсі більш широкосмугового узгодження АФС [13].

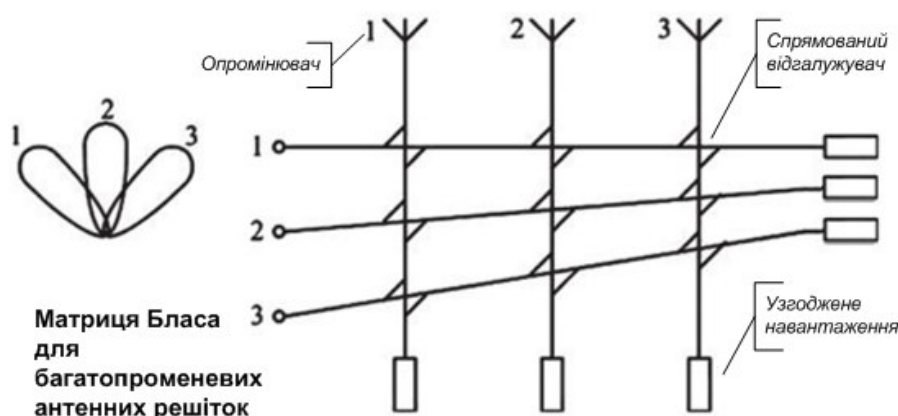


Рисунок 1.5 – Спосіб побудови багатопроменевої фазованої антенної решітки

Керування діаграмою спрямованості ФАР реалізується через зміну розподілу амплітуд та фаз в розкритті АР за допомогою аналоговим або цифровим чином керованих високочастотних фазообертачів, фазо-амплітудних комутаторів, керованих атенюаторів, тощо.

ФАР також підтримують паралельне живлення опромінювачів на базі розподільників оптичного типу, в яких керування розподілом амплітуд та фаз ЕМЕ реалізується в окремих модулях. В таких ФАР можливо реалізувати два варіанти живлення опромінювачів: відбивний та прохідний, що обумовлює відповідні назви систем: відбивні ФАР та прохідні ФАР [3]. Іноді прохідні ФАР відносяться до керованих радіооптичних систем (радіолінз), також для збільшення можливостей сканування ФАР використовують комбінації ФАР – радіолінза, такий варіант найбільш часто застосовують у плоских ФАР на

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

відміну від ФАР на основі циліндричних АР, де опромінювані комутаторами підключаються до системи збудження із різних напрямків вздовж обвідної циліндра, що забезпечує сканування кутів огляду 360 градусів.

Вказані переваги та особливості роботи АФАР, а також інтегроване спряження із цифровими процесорними системами керування обумовило їхню перспективність і широке впровадження незважаючи на підвищену вартість та складність.

### 1.2.2 Класифікація та застосування фазованих антенних решіток

ФАР містять значну кількість керованих елементарних опромінювачів (іноді 1000 і більше) та завдяки своїм позитивним якостям застосовуються практично у всіх типах радіоелектронної апаратури за розміщенням: стаціонарних та рухомих, наземних та повітряних (космічних), авіаційних та корабельних, тощо[1].

Проведений попередній аналіз дозволяє виділити основні переваги ФАР, що обумовили перспективність їх застосування як в промисловій, так і в військовій галузі:

- 1) швидкий огляд простору під час електронного сканування одним або декількома променями ДСП антени;
- 2) загальний підвищений рівень випромінюваної потужності;
- 3) можливість використання у суміщеному режимі як на прийом та передачу багатьох джерел високочастотних сигналів;
- 4) високий рівень адаптаційних можливостей в рамках радіоелектронної розвідки та радіоелектронної протидії;
- 5) можливість проведення попередньої обробки надвисокочастотних (НВЧ) сигналів без перетворення частоти;
- 6) широкі можливості щодо конструктивного інтегрального виконання, сегментації, віддаленого керування;.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Сучасні ФАР мають різноманітну форму, апертуру та конструкторське виконання (рис.1.6). Відрізняються також ФАР і за застосовуваними елементарними опромінювачами, в якості яких зазвичай використовують прості слабо спрямовані вібраторні, щілинні, рупорні та планарні антени [4].

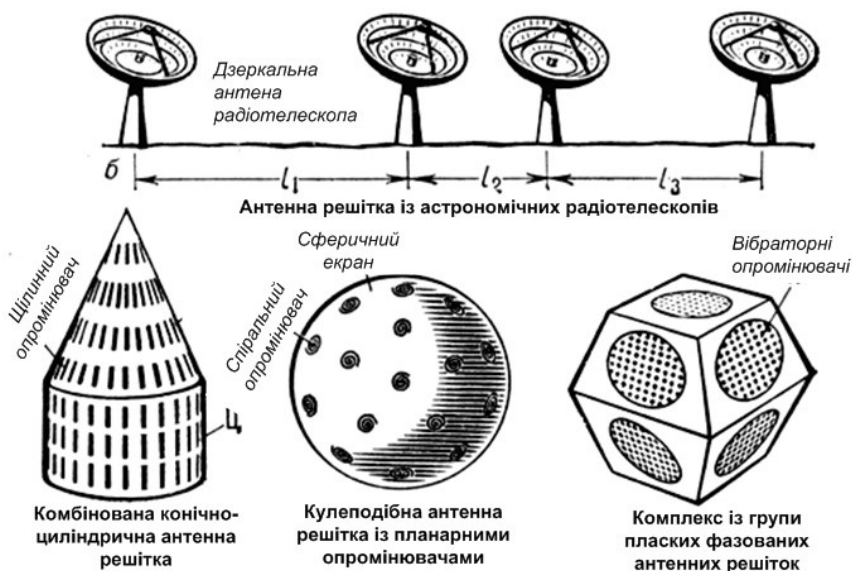


Рисунок 1.6 – Приклад конструкцій простих та складних антенних решіток.

Межі кутової зони простору для сканування за допомогою ФАР визначаються ДСП її елементарних опромінювачів. Якщо зона сканування має бути великою (більше 60 градусів), то у ФАР переважно використовують слабкоспрямовані вібратори різних типів: симетричні й несиметричні, планарні та дротяні; щілинні та діелектричні, тощо (див. рис.1.4).

Зменшити межі кутової зони сканування ФАР для покращання спрямованих властивостей головної пелюстки можливо за допомогою дзеркальних рефлекторів або для кожного опромінювача, або для фазованої антенної решітки загалом [2,5].

Якщо апертура ФАР занадто велика то із конструкторсько-технологічної точки зору краще її подавати через сукупність окремих невеликих ФАР (модулів ФР) ДСП який орієнтовано в одному напрямку, можливо також і побудова комплексних ФАР, парціальні решітки яких орієнтовано в різних

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

напрямок. Можливо також застосовувати комбіновані способи сканування простору, де повільне сканування реалізується механічно, а швидке – та високоточне – електричним шляхом за допомогою ФАР (див. рис.1.6).

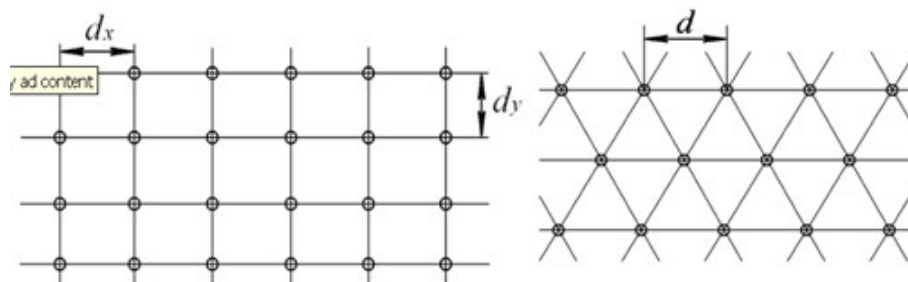


Рисунок 1.7 – Точки розташування опромінювачів в вузлах прямокутної та трикутної еквідистантної решітки

Залежно від заданої форми ДСП та зони огляду ФАР взаємне розташування елементів може бути різним (див. рис.1.6) [3]:

- 1) уздовж прямої або кривої (одномірне);
- 2) на поверхні (двомірне):
  - a. пласкій;
  - b. циліндричній;
  - c. конічній;
  - d. сферичній;
  - e. конформній (за конфігурацією об'єкта носія).
- 3) в деякому об'ємі (тривимірні).

Найбільш широко поширені ФАР із пласкою решіткою опромінювачів де напрямок сканування визначається від нормалі площини до до напрямку уздовж опромінювачів. Слід пам'ятати, що коефіцієнт спрямованої дії (КСД) такої ФАР під час відхилення від нормалі зменшується[3].

Здійснити огляд простору в більших кутах без помітного зменшення коефіцієнту підсилення антени (КПА) саме і застосовують використовують ФАР із двомірним розташуванням опромінювачів на непласких опуклих поверхнях або тримірним розташування опромінювачів.

По функціональній залежності розподілу опромінювачів у ФАР різняться еквідистантні й нееквідистантні ФАР. В перших відстань між суміжними опромінювачами однакова, загальна геометрія таких решіток або ортогональна (у вузлах прямокутної сітки), або трикутна (у вузлах трикутної або гексагональної сітки(див.рис.1.7). Завдяки тому, що пласку площину можливо покрити правильними пласкими фігурами лише: трикутник, квадрат та шестикутник [8].

Відстані між суміжними опромінювачами в еквідистантних ФАР досить часто менше робочої довжини хвилі, і ще дозволяє створювати ДСП із однією головною пелюсткою без дифракційних ефектів у вигляді паразитних головних пелюсток, а також гранично низьким бічних пелюсток. Однак кількість елементів у еквідистантних решітках зазвичай набагато більша за кількість елементів у нееквідистантних ФАР [3].

У нееквідистантних ФАР опромінювачі розміщують на різних відстанях один від одного, не виключається також випадкове розміщення! У подібних ФАР більші відстані між суміжними опромінювачами (менше опромінювачів), але не зважаючи на це теоретично і практично доступна мінімізація паразитних променів, однак такі нееквідистантні ФАР із мають більшу апертуру і більші значення бічних пелюсток, а також більш низький КСД ніж еквівалентні еквідистантні ФАР.

### **1.3 Розробка технічного завдання на виріб**

#### **1.3.1 Склад виробу, конструкція та призначення**

Високочастотний субмодуль багатоелементної антени призначений для встановлення в системи АФАР для проведення радіотехнічної розвідки, радіолокації, постановки завад, сканування електромагнітної ситуації, тощо. До складу модуля входять:

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

- 1) керований дискретний фазообертач;
- 2) пристрої узгодження та розв'язки;
- 3) багатокаскадний підсилювач потужності;
- 4) інтерфейс керування;
- 5) вихідний та вхідний високочастотний інтерфейс.

Пристрій з точки зору структуризації є модулем 2-го структурного рівня та складається із окремих модулів 1-го структурного рівня та комутаційних елементів [14,15]. Елементів зовнішнього керування та підлаштування не передбачається. Живлення пристрою забезпечується з боку комплексу радіоелектронного устаткування вищого структурного рівня (рис.1.8).

Конструктивно пристрій являє собою прямокутний блок із розмірами не більше 300x100x100мм, тепловідведення та герметизація (вологозахист) забезпечуються загальним конструктивним рішенням модулів вищого структурного рівня. Допускається виконання блоку для встановлення в відкритих природних умовах та на бортових засобах. Багаторазова комутація субмодуль в модулі вищого структурного рівня не допускається.

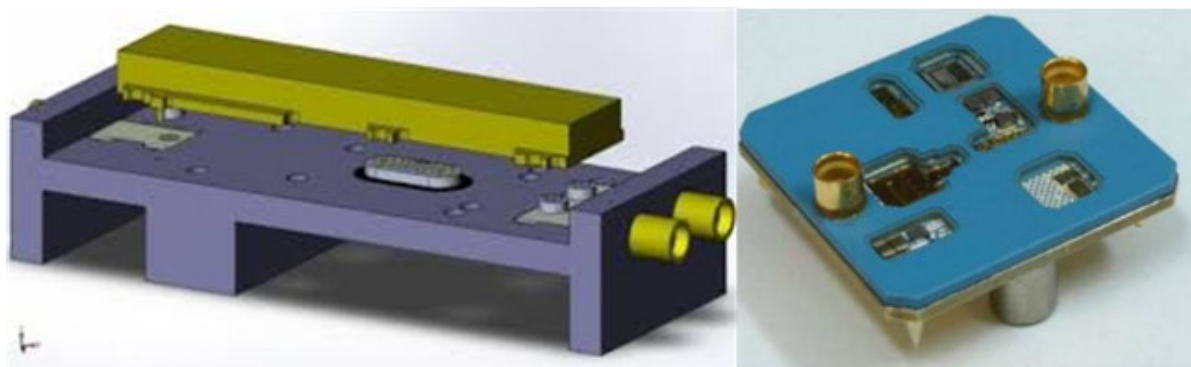


Рисунок 1.8 – Об'ємна(ліворуч) та планарна(праворуч) конструкції модулів активних антенних решіток

Більш докладне формулювання вимог утруднено через обмеженість доступу до інформації завдяки можливості подвійного використання заданих технологій.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

### 1.3.2 Технічні характеристики пристрою

Технічні характеристики високочастотного субмодуль багатоеlementної антени визначаються на основі аналізу функціонально-конструктивних аналогів побудови подібних пристроїв в відомих АФАР та можуть бути розширені або уточнені під час технічних розрахунків. За базові показники взяті найбільш типові відомості із відкритих джерел інформації (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики субмодуля

№	Найменування параметру	Одиниці виміру	Значення параметру	Примітки
1	Середня робоча частота	ГГц	1,1	
2	Ширина спектру частот	МГц	40	не більше
3	Кількість дискретів фазообертача	шт	6	не менше
4	Крок дискретів фазообертача	градус	45	
5	Коефіцієнт підсилення за потужністю	дБ	20	не менше
6	Коефіцієнт корисної дії модуля	%	30	не менше
7	Вихідний хвильовий опір у смузі робочих частот	Ом	50	+/-5
8	Вихідний хвильовий опір у смузі робочих частот	Ом	50	+/-5
9	Напруга живлення модуля	В	26	резервна
10	Загальний струм споживання,	А	3	не більше
11	Різновид модуляції сигналу		фазова	частотна

### 1.3.3 Конструкторські та технологічні вимоги

Основні конструкторські параметри модуля зібрано в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні технічні характеристики субмодуля

№	Найменування параметру	Одиниці виміру	Значення параметру	Примітки
1	Середнє значення робочої температури	0С	10	
2	Діапазон робочих температур	0С	-45...+45	не більше
3	Середній час напрацювання на відмову	год	1000	не менше
4	Гарантований термін служби	рік	5	
5	Тип електрорадіомонтажу		комбінований	об'ємний та друкований
6	Час відновлення працездатності під час ремонту	год	8	не більше
7	Спосіб охолодження	В	Теплопередача	
8	Кліматичне виконання		відкритому повітрі	
9	Моніторинг кліматичних умов		загальний, з боку модуля	

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

## 2 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ

### 2.1 Активні фазовані решітки та керування променем

#### 2.1.1 Активні фазовані антенні решітки

Найбільші можливості щодо варіації керування характеристиками та параметрами ДСП мають активні ФАР (АФАР), що мають не тільки широкі можливості керувати як фазовим зсувом та амплітудою сигналу, але і забезпечують значне підсилення сигналу[1].

Керування фазовим зсувом сигналів опромінювачів в АФАР відбувається в тракті проміжної частоти, колах збудження когерентних передавачів, в схемах гетеродинів приймальних АФАР, тощо(рис.2.1). Керування в кола збудження когерентних передавачів найбільш часто використовується у радіооптичних системах АФАР, в даному випадку ускладнюється інтерфейс керування передавальною фазованою структурою, але покращується живучість системи через відносну незалежність функціонування модулів, де виходячи з ладу один або декілька модулів несуттєво впливають на результат формування хвильового фронту [7].

Отже, в АФАР електронні фазообертачі можуть працювати в частотному діапазоні, що суттєво відрізняється від частотного діапазону живлення решітки опромінювачів. Цим вдається зменшити втрати сигналів у фазообертачах, що позитивно відбивається на загальному ККД АФАР.

Таким чином АФАР передавальних пристроїв реалізує просторовий доданок когерентних ЕМХ, які генеруються передавальними модулями опромінювачів, а в приймальних пристроях АФАР можлива узагальнена спільна обробка слабких сигналів, прийнятих окремими модулями, що розширює обсяги

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

інформації про джерела радіовипромінювання та створені ними сигнально-кодові конструкції в точці прийому.

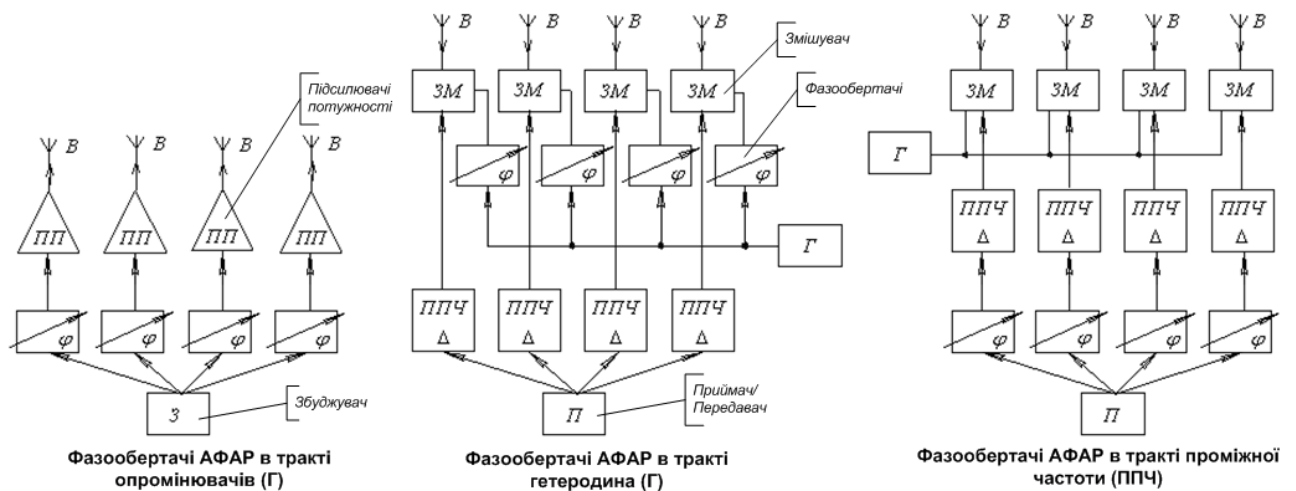


Рисунок 2.1 – Керування фазовим зсувом в різних трактах пристроїв із активними фазованими антенними решітками

В АФАР збільшується рівень паразитних сигналів в зоні опромінювачів, через активний характер модулів та взаємодію окремих модулів, фідерів та опромінювачів між собою, що особливо сильно проявляються під час швидкого сканування простору [4]. Для боротьби із негативними наслідками погіршення електромагнітної ситуації в зоні опромінювачів застосовують спеціальні методи розв’язки між елементами АФАР.

### 2.1.2 Керування фазовими зсувами опромінювачів ФАР

Фазовий фронт у перерізі опромінювачів ФАР формується в основному за рахунок використання керованих фазообертачів. За реалізацією способом керування фазовим зсувом різняться такі ФАР [2,3]:

- 1) із електромеханічною зміною фазового зсуву, наприклад, через зміну геометрії живлячого опромінювача фідерної хвилеводної системи (рис.2.2);

- 2) із частотно керованим скануванням, що ґрунтується на фазочастотних залежностях (ФЧХ) живлячого фідера, наприклад, за допомогою зміни довжин фідера між опромінювачами, а бо через наявність певної дисперсії хвиль у фідері;
- 3) із суто електричним скануванням, що реалізується на фазообертачах різних типів, що керуються електричним сигналом:
  - а. аналоговим сигналом, що забезпечує плавну зміну напрямку головної пелюстки під час сканування;
  - б. ступінчастим сигналом або дискретним, що змінює фазовий кут із певним кроком і реалізується надвисокочастотних перемикачах.

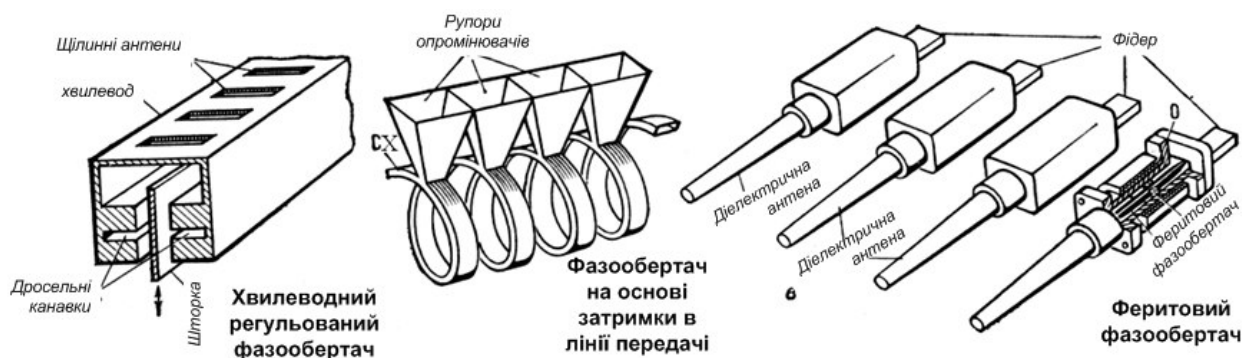


Рисунок 2.2 – Приклади побудови ФАР на основі фазообертачів різни типів

Найбільш перспективні ФАР із електрично керованими фазообертачами, вони забезпечують найшвидшу зміну фазових зсувів із припустимим коефіцієнтом корисної дії (ККД). У зоні надвисоких частот (НВЧ) широкого розповсюдження набули феритові і напівпровідникові фазообертачі, що мають мікросекундну швидкодію та забезпечують ККД близько 80% [15,16].

Керування роботою електронних фазообертачів має бути реалізовано на швидкодіючих аналогових або цифрових схемах. Зазвичай в топології решітки використовується групове керування елементами, наприклад, рядками та

стовпчиками матриці, що робиться зазвичай в плоских ФАР. В більш складних ФАР здійснюється керування кожним фазообертачем окремо.

### 2.1.3 Вимоги і параметри фазообертачів для антенних решіток

Фазообертач(ФО) призначений для зміни фазового зсуву ЕМХ на виході відносно входу на заданий кут. Зонами застосування та функціональними призначеннями фазообертачів є [6]:

- 1) зміна фазочастотного спектру сигналу, а отже і зміна його форми;
- 2) компенсація фазових та фазочастотних спотворень в каналах зв'язку;
- 3) реалізація фазової модуляції та демодуляції сигналів;
- 4) вирівнювання електричної довжини лінії в радіоканалах передачі;
- 5) керування фазовими зсувами під час когерентної обробки сигналів;
- 6) калібрування ділянок напрямних структур в антенній техніці;
- 7) підвищення еквівалентних тактових частот обробки в паралельних системах, тощо.

Важливими параметрами керованих ФО є [17]:

- 1) діапазон можливих змін фазового зсуву;
- 2) ККД або втрати під час обробки сигналів та керування їх процесом;
- 3) припустима смуга частот;
- 4) швидкість передачі сигналів та швидкість переналаштовування;
- 5) функціональна залежність від сигналів керування;
- 6) габарити, маса, вартість, конструкція технологія, захист від зовнішніх факторів впливу;
- 7) калібрування ділянок напрямних структур в антенній техніці;
- 8) підвищення еквівалентних тактових частот обробки в паралельних системах, тощо.

Вибір типу ФО для ультрависокочастотних пристроїв залежить також від того, на базі яких ліній передачі виконана схема фазової затримки: хвилеводів,

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

коаксіалів, смужкових та мікросмужкових ліній передачі, пристроїв функціональної електроніки, тощо. Крім того, ФО слід розглядати разом із типом опромінювача та активного елемента керування.

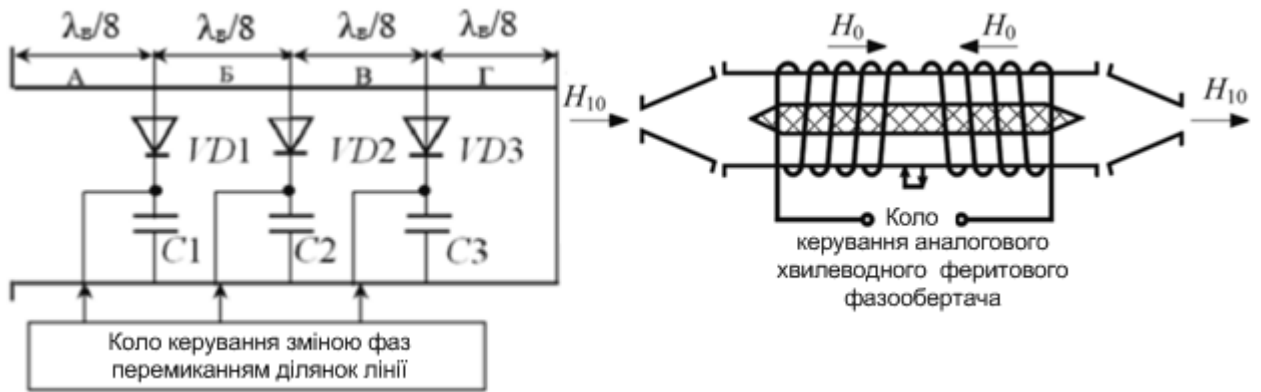


Рисунок 2.3 – Схематична будова цифрового та аналогового фазообертачів для побудови активних фазованих антенних решіток

Найбільше застосування для пристроїв НВЧ знайшли напівпровідникові та феритові ФО (рис.2.3), які поділяються на ряд груп за спорідненими ознаками [17]:

- 1) Прохідні та відбиваючі ФО. В перших розділено вхід та вихід, в других є один вхід – вихід. За умови застосування пристроїв мостового поділу потужностей схемотехнічно один може бути перетворено в інший. Прохідні ФО теоретично забезпечують зсув фаз на будь-який кут (0...360 градусів).
- 2) Аналогові та дискретні. В перших фазовий зсув під керуючою дією змінюється неперервно, в других із деяким кроком – дискретно.
- 3) Взаємні та невзаємні. В перших входи та виходи можливо поміняти місцями, зазвичай це фазообертачі пасивного типу або відбиваючі ФО. У других, як правило, присутні активні елементи із вхідними та вихідними колами, що не припускають зворотного порядку проходження сигналів. У

взаємних ФО фазовий зсув не залежить від напрямку поширення енергії сигналу крізь нього.

4) Без функції пам'яті керуючої дії та із функцію запам'ятовування встановленого фазового зсуву, тощо.

Як правило до 2..3ГГц застосовують напівпровідникові ФО, що мають вигідно менші розміри, порівняно малі втрати, а їх дискретне керування фазовим зсувом добре збігається із широким застосуванням цифрових керуючих систем. Керування променями АФАР із дискретним кроком фазового зсуву призводить до деяких неточностей спрямувань, а також підвищення рівня бічних пелюсток ДСП [15,17].

Основним елементом дискретного ФО (див.рис.2.3) є високошвидкісний електронний ключ, що може бути виконано на ключових діодах та транзисторах. Перемикання такими електронними ключами здійснюється за час, що дорівнює десяткам наносекунд.

## 2.2 Модулі фазованих решіток та їх складові

### 2.2.1 Проектування модулів активних фазованих решіток

Модулем АФАР [1] називають конструктивно відокремлений пристрій ФАР, до якого входять проста антена – опромінювач, активні підсилювальні елементи, опціонально - фазообертач, НВЧ тракти (хвилеводи), елементи конструкції, стабілізації та захисту від зовнішніх факторів впливу (рис.2.4).

АФАР можуть бути як приймальними так і передавальними, а також суміщеними приймально – передавальними. Завдяки великій кількості опромінювачів під час розробки модулів АФАР слід мінімізувати вартість антени загалом. Під час проектування передавального активного модуля АФАР використовують автогенератор, або радіочастотний підсилювач потужності

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

(генератор із зовнішнім збудженням), або сукупність підсилювальних каскадів із помноженням частоти. В останньому випадку множення частот, схема розподілу сигналів модулів працює на менших потужностях та менших частотах, що різко збільшує ККД АФАР загалом [1].

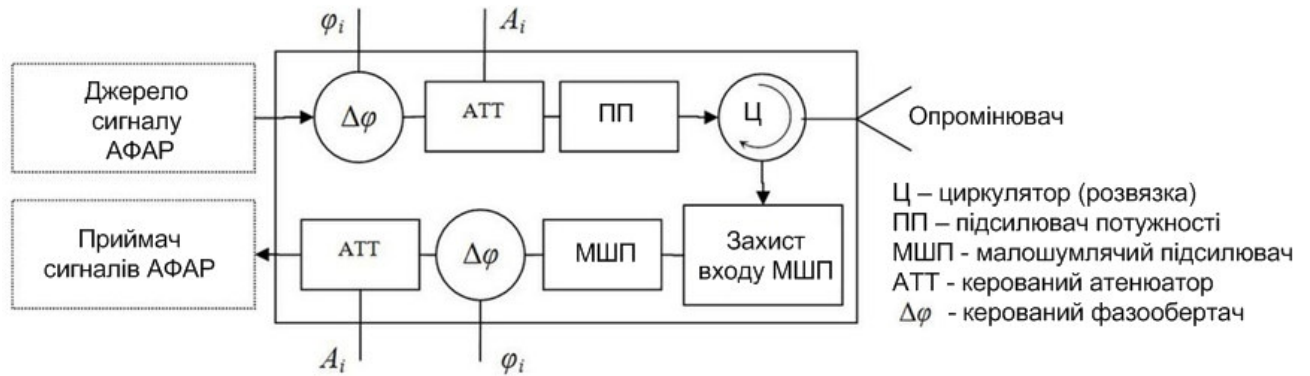


Рисунок 2.4 – Структурна схема типового приймально-передавального модуля активної фазованої антенної решітки

За досвідом проектування АФАР до активних елементів та схем їх включення модулів АФАР висуваються наступні загальні електричні вимоги:

- 1) ККД – не менше 40%;
- 2) коефіцієнт підсилення за потужністю - не менше 10дБ;
- 3) робоча смуга частот – не менше 5% від значення робочої частоти;
- 4) низький рівень шуму та стабільність параметрів.

Розвиток виробництва НВЧ активних напівпровідників: біполярні та польові потужні надвисокочастотні транзистори, змішувальні, помножувальні перемикаючі і генераторні діоди НВЧ дозволив в практику проектування модулів АФАР ввести технологію гібридних інтегральних схем, що позитивно відбивається на рівні мініатюризації та розширенні зон застосування АФАР в бортових радіоелектронних пристроях [17].

Слід зазначити, що напівпровідникові пристрої НВЧ часто проектують із застосуванням спрощених моделей та наближеними методами, завдяки складності врахування всіх аспектів нелінійної обробки в них. Остаточне

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

доведення до працездатних зразків часто проводиться емпірично на останніх етапах науково-конструкторських досліджень.

### 2.2.2 Конструкторське виконання фазообертачів

Конструкція ФО переважно визначається діапазоном робочих частот, припустимими межами керування фазовими зсувами і точністю їх встановлення. На частотах до декількох мегагерц як ФО застосовують зосереджені реактивні чотириполюсники із змінними параметрами для реалізації процесу керування кутом фазового зсуву.



Рисунок 2.5 – Основні типи ліній передачі для ультрависокочастотного діапазону

В діапазоні дециметрових хвиль найбільш поширені фазообертачі на відрізках пасивних ліній передач (рис.2.5), робота яких ґрунтується на зміні електричної довжини передавальної структури під дією керування. До регульованих ФО НВЧ діапазону відносять[18,19]:

- 1) ФО на основі розсувних секцій коаксіальних ліній, регульована за допомогою зміни струму;
- 2) діелектричні хвилеводні ФО, що містять рухоми механічним чином пластину з діелектрика, яка змінює фазову швидкість в хвилеводі;
- 3) ФО на базі мостових НВЧ структур (циркуляторах) із рухомих перетином пліч мосту (шлейфами);
- 4) напівпровідникові фазообертачі із р-і-п діодами;

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

5) феритові, сегнетоелектричні, плазмові фазообертачі ґрунтуються на нелінійних явищах у гомогенних матеріалах, тощо.

Найбільш доцільно застосовувати для розроблюваного виробу фазообертачі на р-і-п діодах, що дозволяють змінювати фазовий зсув напряму через власні характеристики, або за допомогою комутації магазину шлейфів із заданим фазовим зсувом.

### 2.2.3 Аналіз та вибір схеми керування фазовим зсувом

В якості ліній передачі напівпровідникових ФО найбільш доцільно застосовувати лінії передачі у вигляді друкованих провідників, що добре узгоджується із вимогами друкованого монтажу. Хвильовий опір таких ліній може бути в межах 20..200 Ом, що цілком достатньо для організації хвильового узгодження. Подібні ФО поділяють на одноступеневі та багатоступеневі [19].

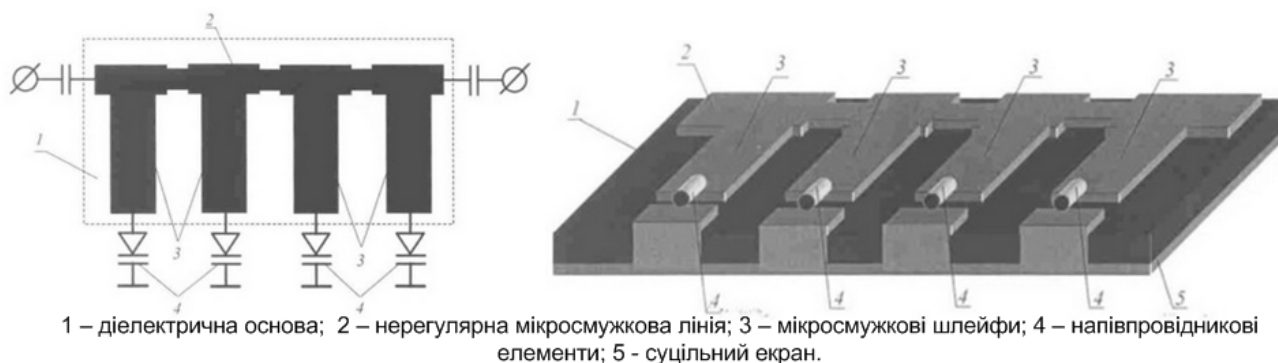


Рисунок 2.6 – Топологія та конструкція напівпровідникового багатоступеневого фазообертача на мікросмужкових лініях із паралельним керуванням

Одноступеневі ФО забезпечують зміну кута фазового зсуву до 45 градусів, під час намагання збільшити цей кут зменшується діапазон робочих частот через розбалансування енергетичного узгодження. Збільшення кількості ділянок призводить до розширення робочих частот, але застосування багатьох паралельних електронних комутаторів є недоцільним.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Ще одним рішенням, що розширює діапазон робочих частот однопрохідного ФО є гібридний ФО, що являє собою спрямовуючий симетричний ЗдБ мікросмужковий чверть хвилевий відгалужувач. В обидва плеча такого мосту ввімкнено одноступеневі відбивні фазообертачі. Паралельна розв'язана робота відбивних ФО забезпечує кращі характеристики за параметри прохідних ФО, але його габарити та вимоги до точності виконання значно вищі (особливо у складі багато каскадних ФО), а також подібні ФО потребують діелектриків спеціальних типів із високою діелектричною проникністю (більше 10 в діапазоні УВЧ).

Для комутації елементів затримки на відрізках мікросмужкових ліній передач фазообертачі застосовуються діоди типу 2A503A[16,17]. Такий діод виконаний на основі сплавних кремнієвих структур типу р-і-n та призначено для застосування в перемикальних структурах, модуляторах, фазообертачах, атенюаторах сантиметрового діапазону хвиль в складі гібридних інтегральних схем в без корпусному варіанті із жорсткими виводами.

Таблиця 2.1 – Основні параметри надвисокочастотного діода 2A503A

№	Назва	Розмірність	Значення
1	Пряма напруга	В	0,3
2	Прямий опір еквівалентних втрат	Ом	5,0
3	Час прямого відновлення	мкс	6
4	Час зворотного відновлення	мкс	60
5	Середня ємність р-і-n структури	пф	0,4
6	Неперервна потужність розсіювання	Вт	1
7	Імпульсна потужність розсіювання	кВт	1
8	Мінімальне напрацювання на відмову	год	1000
9	Максимальна температура переходу	град С	125

Відповідно розглянутим типам, перевагам та недолікам високочастотних ФО технічному завданню на проект (ТЗ) для верхньої частини діапазону УВЧ найбільш доцільним є застосування топології прохідних мікросмушкових дискретних ФО.

#### 2.2.4 Підсилювач потужності та його елементна база

Передавальний модуль АФАР будується за структурою (див. рис.2.4), де головними блоками є підсилювач потужності та фазообертач. Підсилювачі потужності високочастотних діапазонів переважно будуються за схемою генераторів із зовнішнім збудження (ГЗЗ) [6].

Під час розробки ГЗЗ головними параметрами ТЗ для розрахунків та вибору елементної бази є :

- 1) вихідна потужність в зоні робочих частот;
- 2) коефіцієнт підсилення за потужністю;
- 3) ККД підсилювального модуля за потужністю.

Необхідний коефіцієнт підсилення підсилювача потужності становить:

$$K_p = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = \frac{25}{0,05} = 500(Bm); K_{pдб} = 10 \lg(500) \cong 27дБ, \quad (2.1)$$

де  $P_{вих}$  – потужність сигналу на виході модуля;

де  $P_{вх}$  – потужність сигналу на вході модуля;

$K_{pдб}$  – рівень коефіцієнту підсилення в децибелах.

Зазвичай втрати потужності в фазообертачах прохідного типу не перевищують декілька децибел, із деяким запасом оберемо 3 дБ, звідки із урахуванням запасу потужності:

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$K_{P_{\text{дб}}} = K_{P_{\text{дб}}} + K_{\epsilon} \cong 30 \text{дБ}, \text{ а } K_P = 10^{K_{P_{\text{дб}}}/10} = \text{до } 1000 (\text{разів}); \quad (2.2)$$

Таке підсилення за потужністю забезпечити за допомогою одного каскаду підсилення практично неможливо, звідки висновок: для забезпечення заданого підсилення модуль АФАР має складатись щонайменше із двох каскадів підсилення.

Завдяки тому, що в складі такого модуля АФАР має застосовуватись напівпровідниковий фазообертач, то логічно в якості підсилювального елемента обрати теж напівпровідниковий елемент, зазвичай це транзистор або спеціалізований діод. Параметричні діоди застосовуються на частотах діапазону НВЧ [10], в нашому випадку має місце діапазон УВЧ, де існує певна номенклатура потужних транзисторів із високою граничною частотою. Найбільш привабливим за характеристиками та зоною застосування є транзистор MRF15030 фірми Motorola із основними параметрами, що задано у додатку А та табл.2.1

Таблиця 2.2 – Параметри транзистора MRF15030

№	Назва	Розмірність	Значення
1	Мінімальна рекомендована робоча частота	ГГц	1,0
2	Максимальна рекомендована робоча частота	ГГц	2,0
3	Вихідна потужність	Вт	до 30
4	Мінімальний коефіцієнт підсилення за потужністю	дБ	9
5	Рекомендована робоча напруга живлення	В	26

Активним елементом, на якому виконаємо підсилювач, оберемо транзистор. Вибір здійснюємо виходячи із вимог ТЗ до модуля АФАР: вихідна потужність модуля  $P_{вихМ}=25$  Вт, робоча частота  $f=1,1$  ГГц . Цим вимогам повністю відповідає ультрависокочастотний біполярний транзистор MRF15030.

Необхідне підсилення сигналу через використання транзисторів даного типу можливо організувати через застосування 2-3 однотипних послідовних каскадів.

### 2.2.5 Перспективність та напрямки удосконалення ФАР

Через досягнення мікроелектроніки та поступовий рух до опанування активними елементами все більших та більших частот, розвиток техніки, технологій та наукових досліджень ФАР все більш сильно пригортає увагу радіоінженерів. В цьому аспекті перед фахівцями ставиться наступний ряд завдань [11-13]:

- 1) розробка нових типів ФАР, зокрема АФАР та розширення зон їх застосування в напрямку збільшення комфортних властивостей;
- 2) збільшення кількості опромінювачів та використання потужних систем цифрової, адаптивної, нейронної обробки сигналів на початкових етапах прийому – передачі;
- 3) глибокі теоретичні дослідження щодо керування скануванням великої кількості незалежних променів ФАР;
- 4) дослідження методів та методик побудови ФАР підвищеної апертури із нееквідистантним розташуванням опромінювачів, що особливо важливо в глобальних проектах, таких як побудова глобальних ФАР для астрономічних досліджень;
- 5) дослідження та ідеї щодо методів і методик пригнічення або зменшення впливу перехресних зв'язків між елементами конструкції антенно-фідерного тракту АФАР;

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

- 6) розробка спеціалізованого програмного забезпечення для пришвидшення проектування ФАР;
- 7) розробка теорій і поступове впровадження нових технологій обробки сигналів адаптивних ФАР для автоматичного керування фазообертачами, що в кінцевому рахунку максимізує відношення сигнал – завада.

Вирішити поставлені завдання можливо із застосуванням новітніх матеріалів [20] та технологій друкованого монтажу на базі смужкових і мікросмужкових ліній передачі, що дозволяє не тільки використати вже розроблене програмне забезпечення для такої мети, але і покращити конструкторські тактичні характеристики (маса, готовність, габарити). Однак застосування друкованих провідників спряжене із зростанням втрат в них із зростанням робочих частот, тому натепер досі більшість ФАР побудована на базі хвиле водних технологій передачі та обробки сигналів.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

### 3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

#### 3.1 Розробка ультрависокочастотного фазообертача

##### 3.1.1 Вихідні дані та вибір матеріалу

Фазообертач із керуванням за допомогою напівпровідникових діодів реалізується за допомогою мікросмужкових ліній передач із топологією заданої конфігурації. Вихідні дані для розробки фазообертача модуля АФАР зведено до табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Початкові дані для розробки дискретного мікросмужкового фазообертача

№	Назва	Розмірність	Значення
1	Робоча частота	ГГц	1,1
2	Кількість дискретів фазових зсувів	-	3
3	Значення дискретів фазових зсувів	градус	45,90,180
4	Вхідний хвилевий опір фазообертача	Ом	50
5	Вихідний хвилевий опір фазообертача	Ом	50
6	Втрати сигналу	дБ, не більше	2 дБ

Підкладка фазообертача має відповідати вимогам до загальної конструкції модуля АФАР. В першу чергу вимоги щодо мінімізації модуля призводять до необхідності вибору як одного матеріалу для фазообертача так і для підсилювача потужності, крім того, від правильного вибору матеріалу підкладки мікросмужкової лінії залежить рівень втрат і топологія синтезованих мікросмужкових ліній. А також матеріал має бути однорідним і високою діелектричною проникністю, що дозволить мінімізувати розміри схеми фазо

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

обертання. Характеристики матеріалів [19-21], рекомендованих для використання у високочастотних друкованих модулях із елементами мікросмужкових шлейфів представлено в табл.3.2.

Під час вибору матеріалу слід керуватись не тільки електричними характеристиками, але і конструкторськими параметрами матеріалів, в першу чергу інтервалом робочих температур та стабільністю параметрів в робочому термальному інтервалі.

Таблиця 3.2 – Параметри підкладок для мікросмужкових лінії передач

Назва діелектрику $\square$	$\epsilon$ на $f = 10^6 \text{ Гц}$ при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\square$	$\text{tg}\delta$ на $f = 10^6 \text{ Гц}$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\square$	Робочий інтервал температур, $^\circ\text{C}$ $\square$
Сополімер САМ $\square$	2,6 $\square$	$4,5 \cdot 10^{-4}$ $\square$	-60– +80 $\square$
ПТ-3 $\square$	2,84 $\square$	$(7-9) \cdot 10^{-4}$ $\square$	-60– +85 $\square$
ПТ-5 $\square$	5 $\square$	$(7,5-9) \cdot 10^{-4}$ $\square$	-60– +85 $\square$
ПТ-7 $\square$	7 $\square$	$9 \cdot 10^{-4}$ $\square$	-60– +85 $\square$
ПТ-10 $\square$	10 $\square$	$12 \cdot 10^{-4}$ $\square$	-60– +85 $\square$
ПТ-16 $\square$	16 $\square$	"	-60– +90 $\square$
Фторопласт-4 $\square$	2,0–2, 1 $\square$	$2,5 \cdot 10^{-4}$ $\square$	-60–+250 $\square$
Склотекстоліт СКМ-1 $\square$	4, 16–4,83 $\square$	$(3-6) \cdot 10^{-3}$ $\square$	-60– +200 $\square$
Поліетилен високого тиску $\square$	2,3 $\square$	$3 \cdot 10^{-4}$ $\square$	-70– +120 $\square$

Виходячи із висунутих вимог, найбільш доцільним є застосування матеріалів ПТ із діелектричною проникністю до 10 [20].

Мікросмужкові лінії та мікросмужкові шлейфи мають бути розраховані таким чином, щоб їх робоча частота не перевищувала деяку критичну частоту. За не виконання цієї умови в передавальній структурі поширюються хвилі, які не відповідають вимогам Т-моди (перпендикулярна ЕМХ). Поява вищих мод, або поверхневих мод призводить до їх взаємодії із основною модою коливань, що в кінцевому рахунку призводить до спотворення фаз і амплітуд сигналів. [10,15]. Для запобігання цьому ефекту слід дотримуватись умови:

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$$h < h_{кр}, \quad (3.1)$$

де  $h$  – товщина підкладки, мм;

$h_{кр}$  – критична товщина підкладки для заданої робочої частоти.

Критична висота визначається частотою сигналу та може бути обрахована за таким виразом:

$$h_{\max} (\text{мм}) = \frac{75}{f \cdot \sqrt{\varepsilon - 1}}, \quad (3.2)$$

де  $f$  – середня робоча частота підсилювача потужності, ГГц.

$\varepsilon$  – сумарна діелектрична проникність матеріалу підкладки мікросмушкової лінії.

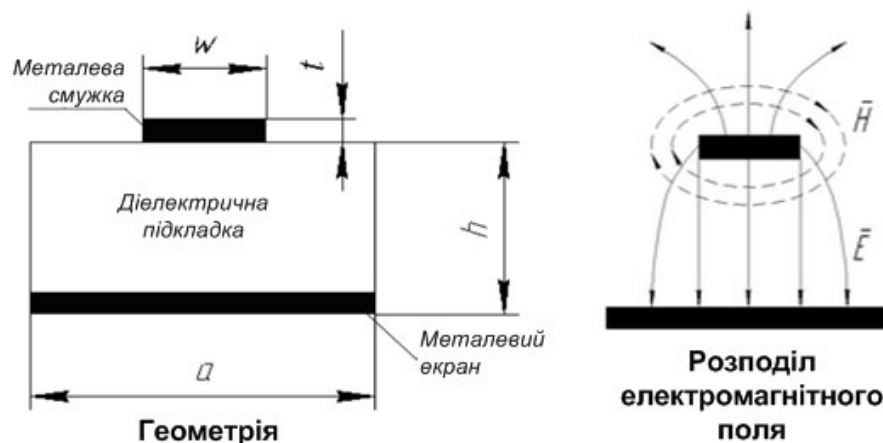


Рисунок 3.1 – Мікросмушкова лінія та її характеристики

Відповідно (3.2) критична висота становить:

$$h_{\max} (\text{мм}) = \frac{75}{1,1 \cdot \sqrt{7,0 - 1}} = 28 (\text{мм}),$$

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

що відповідає умові (3.1). Отже на даних частотах висоту підкладки (рис.3.1), що для мікросмужкових ліній не перевищує декілька міліметрів, можливо не обмежувати.

Всі електродинамічні параметри мікросмужкової лінії визначаються не тільки геометрією, але і частотою, наприклад, із зростанням відношення частоти до висоти лінії передачі збільшується ефективна відносна діелектрична проникність [18]. Саме від останньої залежить робоча довжина хвилі в лінії, що завжди менша за довжину хвилі в вакуумі (ефект скорочення):

$$\lambda_p = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{ef}\mu_{ef}}} = \frac{c}{f_0\sqrt{\varepsilon_{ef}\mu_{ef}}} \cong \frac{c}{f_0\sqrt{\varepsilon_{ef}}}, \quad (3.3)$$

де  $\lambda_p$  – довжина ЕМХ Т-типу у середовищі;

$\lambda_0$  - довжина ЕМХ у вакуумі;

$f_0$  - робоча частота лінії передачі;

$\varepsilon_{ef}$  - ефективна діелектрична проникність.

Саме ефект скорочення дозволяє розробляти мініатюрні пристрої аж до інтеграції їх в гібридні інтегральні схеми, в тому числі і для створення модулів АФАР. Обраний матеріал у вигляді склотекстоліту виготовляється товщиною до 2мм. Більші товщини призводять до неможливості отримання заданого хвилевого опору та однорідності, а менші до послаблення механічної жорсткості для великих плат, тому обираємо середню товщину діелектричної підкладки у 1,5мм.

### 3.1.2 Розрахунок топології фазозсувних ланок

Завдяки розташуванню частини ЕМП в поперечному перетині мікросмужкової лінії передачі у повітрі над поверхнею сигнальної мікросмужки

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

ефективне значення діелектричної проникності зменшується. В результаті ефективна діелектрична проникність є комбінацією діелектричних проникностей повітря ( $\epsilon = 1$ ) та діелектрика підкладки ( $\epsilon = 10$ ). Ефективна діелектрична проникність також залежить від насичення ЕМП зони передавальної структури та може бути обрахована як:

$$\epsilon_{\text{ефк}} = 0,5 \times \left( \epsilon + 1 + \frac{\epsilon - 1}{\sqrt{1 + 10 \cdot \frac{h}{w}}} \right) = 0,5 \times \left( 10 + 1 + \frac{10 - 1}{\sqrt{1 + 10 \cdot \frac{1,5}{1,9}}} \right) \cong 7, \quad (3.4)$$

де  $\epsilon$  - діелектрична проникність матеріалу підкладки;

$\frac{h}{w}$  - відношення висоти розташування сигнальної мікросмушкової лінії

над екрануючим шаром до ширини мікросмушкової лінії  $\frac{h}{w} = \frac{1,5}{1,9}$ .

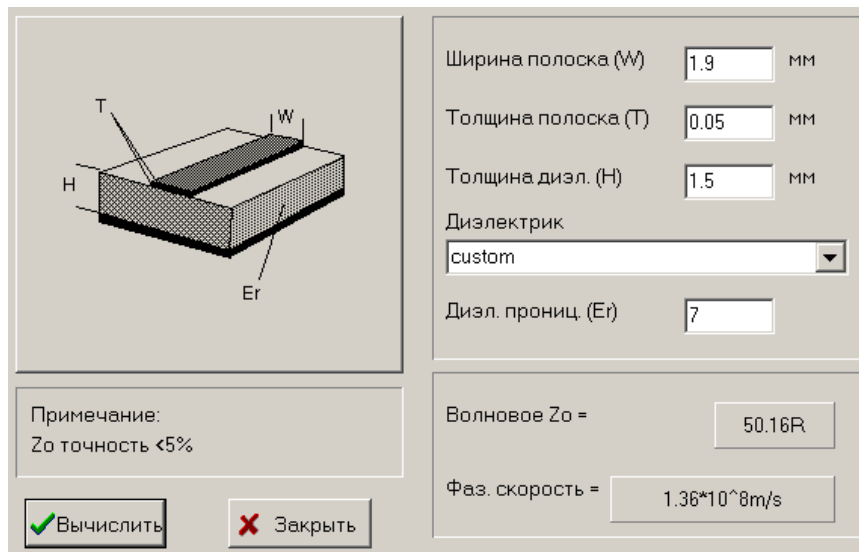


Рисунок 3.2 – Результати розрахунку хвильового опору мікросмушкової лінії передачі із заданою геометрією

Хвильовий опір провідної структури мікросмушкової лінії має дорівнювати 50 Ом, для перевірки його дотримання проведемо розрахунки на базі електронного калькулятора СВЧ структур RFSim99 (рис.3.1).

Довжина хвилі у вакуумі на робочій частоті модуля становитиме:

$$\lambda (м) = \frac{c}{f_0} = \frac{3 \times 10^8}{1.1 \times 10^9} \cong 0,28(м), \quad (3.5)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість поширення радіохвилі у вакуумі;

а  $f_0 = 1,1 ГГц$  - робоча частота дискретного фазообертача.

Завдяки уповільненню ЕМХ в середовищі та Т-моді поширення робоча довжина хвилі мікросмужки (за 3.3) становить:

$$\lambda_p (см) = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{эф}}} \cong \frac{28}{\sqrt{7}} \cong 12,2(см).$$

Надалі слід визначити довжину ділянок мікросмужкових ліній, що забезпечують отримання дискретів фазового зсуву за ТЗ [6]:

$$l_i = \frac{\lambda_p \cdot \Delta\varphi_i}{360^\circ}, \quad (3.6)$$

де  $\Delta\varphi_i$  – фазовий зсув для дискретів, що задано в ТЗ на розробку.

Відповідно (3.6) необхідно застосувати три ділянки лінії передачі, для яких довжини визначаються як:

$$l_{45^\circ} = \frac{12,2 \times 45^\circ}{360^\circ} \cong 15,3(мм); \quad l_{90^\circ} = \frac{12,2 \times 90^\circ}{360^\circ} \cong 30,5(мм); \quad l_{180^\circ} = \frac{12,2 \times 180^\circ}{360^\circ} \cong 60,1(мм).$$

Дискретний прохідний фазообертач модуля АФАР має мати у складі три каскади однакової структури (див.рис.3.3), що встановлено один за одним,

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

керування каскадами здійснюється за постійним струмом комутаційними діодами.

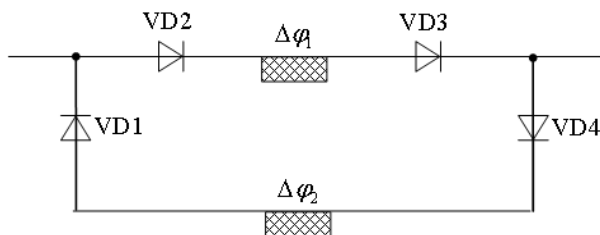


Рисунок 3.3 – Фрагмент електричної схеми ланки прохідного дискретного фазообертача

Діоди ланки прохідного фазообертача (рис.3.3) працюють у режимі перекидного вентиля, тобто коли закривається один, відкривається інший. Кожна із ланок має мати різницю повинен мати різницю фазових зсувів, розраховану за (3.5), а саме:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1, \quad (3.7)$$

де  $\Delta\varphi_2$  та  $\Delta\varphi_1$  – фазові зсуви під час проходження сигналу через верхню та нижню ділянку каскаду керованого фазообертання.

Виходячи із розмірів типових блоків, що складають до 20 см, опорна ділянка мікросмужкової лінії, що забезпечує деякий фазовий зсув  $\Delta\varphi_1$  припустимо має деяку електричну довжину в 1см. В такому випадку по відношенню до раніш розрахованих електричних довжин додається значення :

$$l_{145^\circ} = 25,3(\text{мм}); l_{290^\circ} = 40,5(\text{мм}); l_{3180^\circ} = 70,1(\text{мм}).$$

Спрощена електрична схема керування прохідним фазообертачем представлена на рисунку 3.4, де конденсатори С1-С4 використовуються як такі, що розділяють каскади за постійним струмом, щоб відокремити струми

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

керування , а котушки індуктивності L1-L6 запобігають протіканню високочастотних струмів через кола керування дискретним встановленням фазового зсуву.

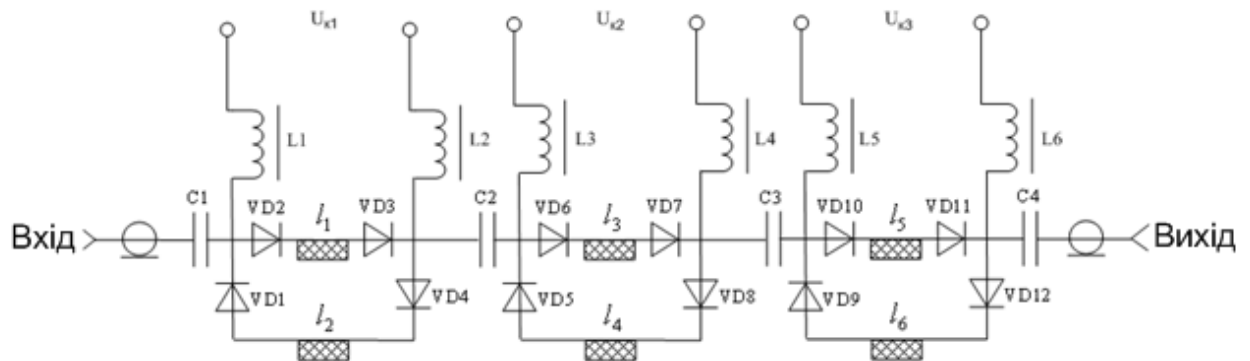


Рисунок 3.4 – Фрагмент електричної схеми триланкового фазообертача

Виходячи із три ланкового насичення структури фазообертача в результаті його роботи може бути отримано 8 значень дискретних фазових зсувів:  $0^{\circ}$ ;  $45^{\circ}$ ;  $90^{\circ}$ ;  $135^{\circ}$ ;  $180^{\circ}$ ;  $225^{\circ}$ ;  $270^{\circ}$ ;  $315^{\circ}$ .

## 3.2 Розрахунок підсилювача потужності

### 3.2.1 Особливості роботи активних елементів на високих частотах

Крім польових та біполярних транзисторів для підсилення сигналів високочастотних діапазонів також застосовують такі напівпровідникові пристрої як параметричні та тунельні діоди. Забезпечення заданого коефіцієнту підсилення для параметричних діодів забезпечується за допомогою «підкачування енергії» коливального контуру синфазно із дією підсилювального сигналу, робота тунельних діодів ґрунтується на відємній ділянці вольт-амперної характеристики [6].

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Діодні УВЧ та НВЧ підсилювачі мають невеликий коефіцієнт підсилення за потужністю та мають працювати із відносно слабкими сигналами, тому для створення потужного сигналу передавача модуля АФАР слід застосовувати транзистори. Транзисторні ультрависокочастотні потужні підсилювачі набагато стабільніше працюють в діапазоні УВЧ та потребують менше елементів чіпсету для забезпечення робочої точки та стабільності використання, не кажучи вже про можливість розсіювання теплових потужностей у декілька ват. [6,8,14].

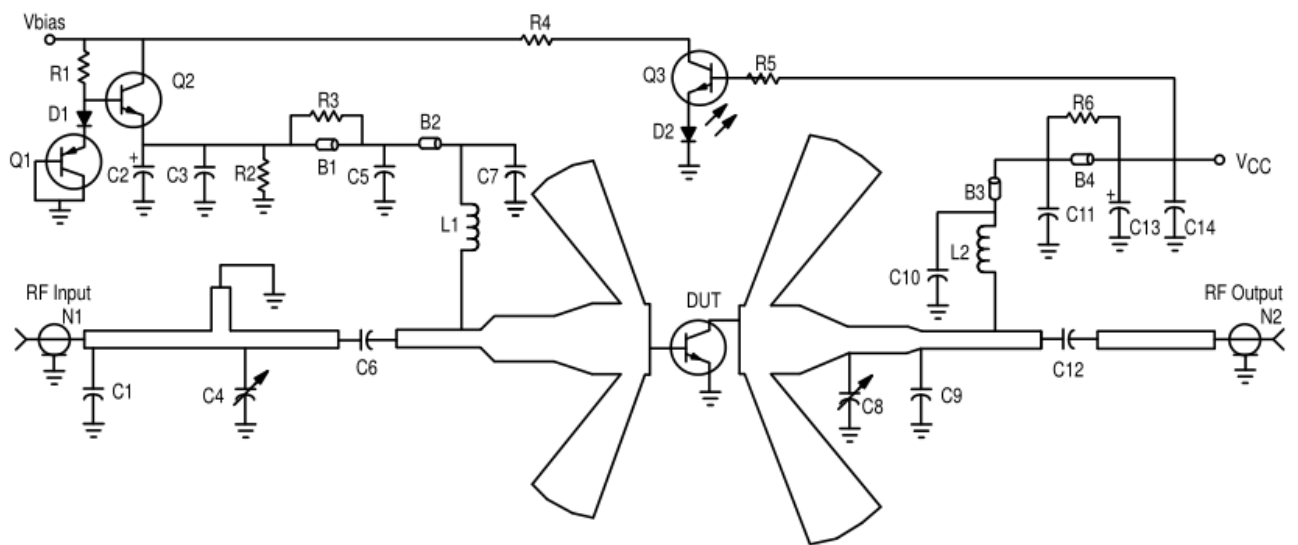


Рисунок 3.5 – Приклад побудови схеми підключення транзистора для роботи в діапазоні ультрависоких частот із керованим зміщенням

Для досягнення мети підсилення високочастотних сигналів застосовують як біполярні транзистори так і польові транзистори[14]. Біполярні транзистори мають загальну ефективність застосування кращу в діапазоні УВЧ, а польові в НВЧ. Це торкається як шумових характеристик, так і проблем із забезпеченням хвильового узгодження параметрів транзисторів із застосовуваними передавальними структурами (рис.3.5). В нашому випадку частота не є аж занадто високою, тому обираємо в якості типу транзистора підсилювача модуля – біполярний транзистор.

										КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							47

Значною особливістю транзисторних схем підсилення сигналів це поява численних шляхів паразитного витоку енергії високочастотних сигналів, що порушує стійкість транзисторних каскадів до самозбудження та втрати функціональності. Це пов'язано із тим, що еквівалентні моделі транзисторів ускладнюються із підвищенням частоти. В них з'являються паразитні елементи, що пов'язують вхідні та вихідні кола транзистора, що приводить до часткової втрати невзаємності транзистора як активного елемента[6].

Стійкість схеми на високих частотах розглядається окремо і в багато чому визначається схемною моделлю заміщення транзистора, для якої переважно застосовують модель чотирьохполосника на основі S-параметрів [1].

Транзисторна модель та рекомендації щодо застосування конкретного транзистора у високочастотному каскаді має обов'язково наводитись у документації на виріб (наприклад, див.рис.3.5), там же має мати місце сукупність його S-параметрів.

### 3.2.2 Високочастотна модель силового елемента

Вихідні дані для проведення розрахунку прикінцевого каскаду відповідають ТЗ на проект, де вихідна потужність підсилювача складає 25Вт за умови живлення напругою 26В в діапазоні робочих частот 1,1ГГц.

В зоні високих частот робочий режим силового елемента підсилення визначається складною динамічною моделлю [6,15,17], де частина моделей елементів є частото залежною (рис.3.6). Нехтувати такими параметрам як індуктивності та прохідні ємності в зоні високих частот є неприпустимим, також враховуються динамічні та статичні опори по всім виводам.

В схемі (рис.3.6) ємностями корпусу потужного НВЧ транзистора можна знехтувати в зв'язку з тим, що власні ємності транзистора відносно перевищують їх.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Параметри моделі транзистора є результатом вимірювань проведених в спеціалізованих лабораторіях та представлені в технічній документації (додаток А). Опосереднення параметрів транзистора проводиться для різних областей робочого режиму області активного підсилення та області відсікання. Також параметри в рамках застосованої моделі в зафіксованому режим роботи вважаються сталими, кінцева перевірка працездатності каскаду проводиться на останніх етапах проектно-конструкторських робіт.

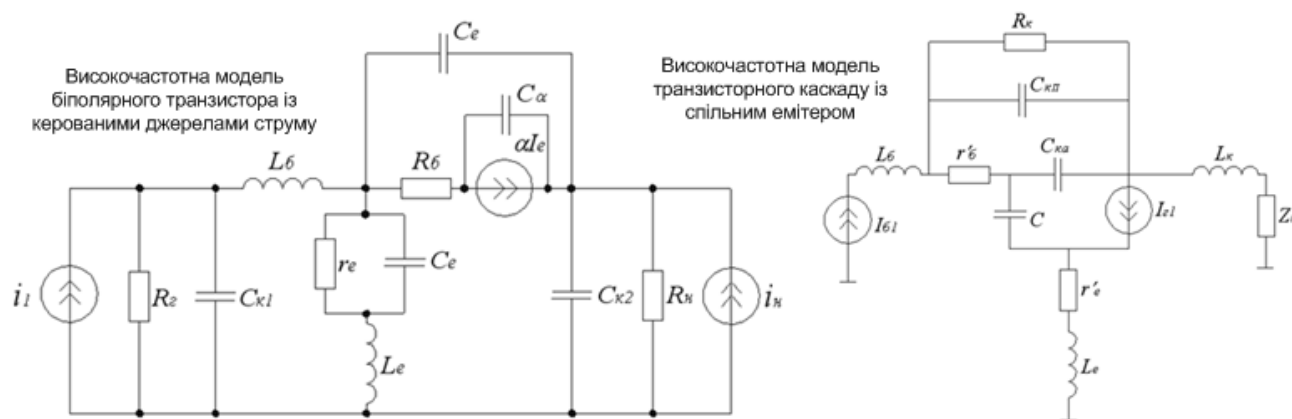


Рисунок 3.6 – Принципова схема моделей транзисторного каскаду підсилення:

$L_k, L_b, L_e$ , – індуктивності виводів колектора, бази та емітера та відповідно;  
 $S_{диф}$ ,  $C_e$  – дифузійна та бар’єрна ємність емітерного переходу відповідно;  $S_{кп}$ ,  $S_{ка}$ , – пасивна і активна складові ємності колекторного переходу транзистора відповідно;  $r_{б'}$ ,  $r_{е'}$ ,  $r_{к}$ ,  $r$ , – стабілізуючий опір, опір матеріалу бази, опір втрат колектора та опір рекомбінації відповідно;  $I_e$  – генератор струму із зовнішнім стиримовим керуванням  $I_i$

Параметри обраного для застосування в підсилювачі потужності транзистора MRF15030 представлено в додатку А та технічній документації на виріб.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

### 3.2.3 Схемотехнічний розрахунок підсилювача модуля

Розрахунок проводиться згідно із інженерною методикою [10,12] для високочастотних каскадів (див.рис.3.6).

На початку проведемо оцінку можливого коефіцієнту підсилення за потужністю, що визначається як:

$$K_{оц} (\text{дБ}) \cong \left( \frac{f_{DS}}{f_p} \right)^2 \times K_p (f_{DS}) = \left( \frac{1,3}{1,1} \right)^2 \times 9 = 12,4 (\text{дБ}), \quad (3.8)$$

де  $f_{DS}$  – робоча частота за прикладом застосування в data sheet;

$f_p$  – робоча частота модуля;

$K_p (f_{DS})$  – типовий коефіцієнт підсилення.

Визначимо опір втрат кола колектора транзистора якщо вважати , що  $r'_k \cong r'_o \cong 1 \text{ Ом}$  як:

$$r_k \cong \frac{1}{(\omega \times C_k)^2 r_k} = \frac{1}{(2\pi \times 1,1 \times 10^9 \times 3,8 \times 10^{-12})^2 \times 1,0} \cong 14,5 (\text{Ом}) \quad (3.9)$$

Для подальших розрахунків слід також оцінити коефіцієнт використання колекторної напруги живлення в граничному режимі експлуатації, але попередньо слід знайти крутизну передачі струму:

$$S_{ep} \cong \frac{15 \times P_{вих}}{U_{Ko}^2} \cong \frac{15 \times 30}{25^2} \cong 0,72 (\text{см}), \quad (3.10)$$

і надалі коефіцієнт використання:

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$$\xi_{ep} \cong 0,5 \times \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{16 \times P_e}{S_{ep} \times U_{Ko}^2}} \right) = 0,5 \times \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{16 \times 27}{0,72 \times 26^2}} \right) \cong 0,4, \quad (3.11)$$

де  $P_e = P_{вих} - 0,1 \times P_{вих} = 30,0 - 0,1 \times 30,0 = 27 (Вт)$ .

Напруга першої гармоніки струму, що протікає в навантаженні передавача через значення ефективної колекторної напруги:

$$U_K \cong \xi_{ep} \times U_{Ko} = 0,4 \times 25 \cong 10 (В). \quad (3.12)$$

$$I_{K1} \cong \frac{2 \times P_{вих}}{U_K} \cong \frac{2 \times 30}{10} \cong 6 (А) < I_{K_{max}} = 10 А \quad (3.13)$$

Приведені до еквівалентного генератора опори навантаження і повний опір:

$$R_K = U_K / I_{K1} = 25 / 6 = 4,2 (Ом); \quad (3.14)$$

$$R'_K = \frac{R_K \times r_K}{R_K + r_K} = \frac{4,2 \times 14,5}{4,2 + 14,5} = 3,2 (Ом); \quad (3.15)$$

Перша гармоніка еквівалентного генератора струму можливо знайти за (амплітудне значення):

$$I_{Г1} = I_{K1} \times \left( 1 + \frac{R_K}{r_K} \right) = 6 \times \left( 1 + \frac{4,2}{14,5} \right) = 7,7 (А). \quad (3.16)$$

Температурно-залежна крутизна колекторного переходу:

$$S_{II} \cong \frac{42,5 \times I_{Г1}}{1 + 3,66 \times 10^{-3} \times t_n} \cong \frac{42,5 \times 7,7}{1 + 3,66 \times 10^{-3} \times 150} \cong 207 (см), \quad (3.17)$$

де  $t_n = 150^{\circ}$  – критична температура колекторного переходу.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Опір рекомбінації в зоні базового переходу:

$$r = \frac{h_{21e}}{S_{II}} = \frac{20,0}{207,0} = 0,1(\text{Ом}). \quad (3.18)$$

Крутизна статичної характеристики передачі колекторного струму якщо  $r'_e \approx 0,3 \times r'_o$ :

$$S \cong \frac{h_{21e}}{r'_o + r + r'_e \times (1 + h_{21e})} \cong \frac{20}{1 + 0,1 + (1 + 20) \times 0,3} = 2,7(\text{см}) \quad (3.19)$$

Проведемо розрахунок додаткових параметрів А, В за умови співвідношення ємностей  $C_e = (5 \dots 10) \times C_K$ :

$$A \cong 0,65 + 0,15 \times \omega_{zp} C_e / S \quad A \cong 0,65 + 0,15 \times \frac{2\pi \times 1,1 \times 10^9 \times 10 \times 38 \times 10^{-12}}{2,7} \cong 0,8; \quad (3.20)$$

$$B \cong 0,67 + \frac{\omega_{zp} C_e}{S} = 0,67 + \frac{2\pi \times 1,1 \times 10^9 \times 10 \times 38 \times 10^{-12}}{2,7} \cong 1,7; \quad (3.21)$$

Коефіцієнт розкладання за умови напруги зсуву статичної характеристики  $U' = (0,6 \dots 0,9) B$ :

$$\gamma_1 \cong \frac{A}{B - (U_{Bo} - U') \times \omega_{zp} \times C_e / I_{Г1}} \cong \frac{0,8}{1,7 - (0,0 - 0,7) \times 2\pi \times 20 \times 1,1 \times 10^9 \times 10 \times 38 \times 10^{-12} / 7,7} \cong 0,12(\text{см}). \quad (3.22)$$

Допоміжні параметри визначаються із номограм [1] і для отриманого  $\gamma_1$  знаходимо проміжні параметри  $g_1 = 1,7$ ;  $\cos(\theta) = 0,45$ .

Амплітуда струму бази транзистора вихідного підсилювального каскаду:

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

$$\begin{aligned}
 I_{\delta 1} &= \frac{\omega}{\omega_{zp}} \times \left[ I_{\Gamma 1} \times \left( \frac{B}{A} + \omega_{zp} \times C_K \times R'_K \right) - \frac{U_{Bo} - U'}{A} \times \omega_{zp} \times C_e \right] = \\
 &= \frac{1,1}{2,0} \times 7,7 \times \left[ \left( \frac{1,7}{0,8} + 2,0 \times 1,1 \times 10^9 \times 10 \times 38 \times 10^{-12} \times 3,2 \right) - \right. \\
 &\left. \frac{0 - 0,7}{0,9} \times 2,0 \times 1,1 \times 10^9 \times 10 \times 38 \times 10^{-12} \right] = 1,9(A)
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Модуль загального коефіцієнта підсилення струму каскаду, приведений до еквівалентного генератора :

$$K_i = I_{K1} / I_{\delta 1} = 6,0 / 1,9 \cong 3,2 (\text{разів}) \tag{3.24}$$

Коефіцієнт підсилення кінцевого каскаду за потужністю становить:

$$K_p = K_i \times \frac{R_K}{I_{\delta 1}} = 3,2 \times \frac{4,2}{1,9} \cong 7,0 (\text{разів}). \tag{3.25}$$

Для визначення потужності споживання слід знайти постійну складову вихідного струму:

$$I_K = I_{\Gamma 1} / g_1(\theta) \cong 7,7 / 1,7 \cong 4,6(A). \tag{3.26}$$

Споживана потужність каскаду становить:

$$P_O = I_K \times U_{Ko} = 4,5 \times 25 = 110,0(Bm) \tag{3.27}$$

ККД підсилювального каскаду:

$$\eta_K = P_{вих} / P_O = 30 / 110 = 0,27 \text{ або } 27\%. \tag{3.28}$$

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Потужність  $P_{розс}$ , що розсіюється на корпусі транзистора за умови потужності збудження  $P_{зб} = P_{вих} / K_p = 30 / 7,0 \cong 4,3 (Вт)$ :

$$P_{розс} = P_0 - (P_{вих} + P_{зб}) = 110 - (30 + 4,3) \cong 76 (Вт). \quad (3.29)$$

Таким чином, передостанній каскад має збільшити потужність високочастотного сигналу до рівня до 5 Вт для «розкачування» сигналу для останнього каскаду, що вимагатиме до 3 каскадів підсилення.

### 3.3 Подільник потужності турнікетної антени

Під час використання високочастотного субмодуль багатоелементної антени передбачається його робота на антенне навантаження у вигляді турнікетної антенної системи (рис.3.7).

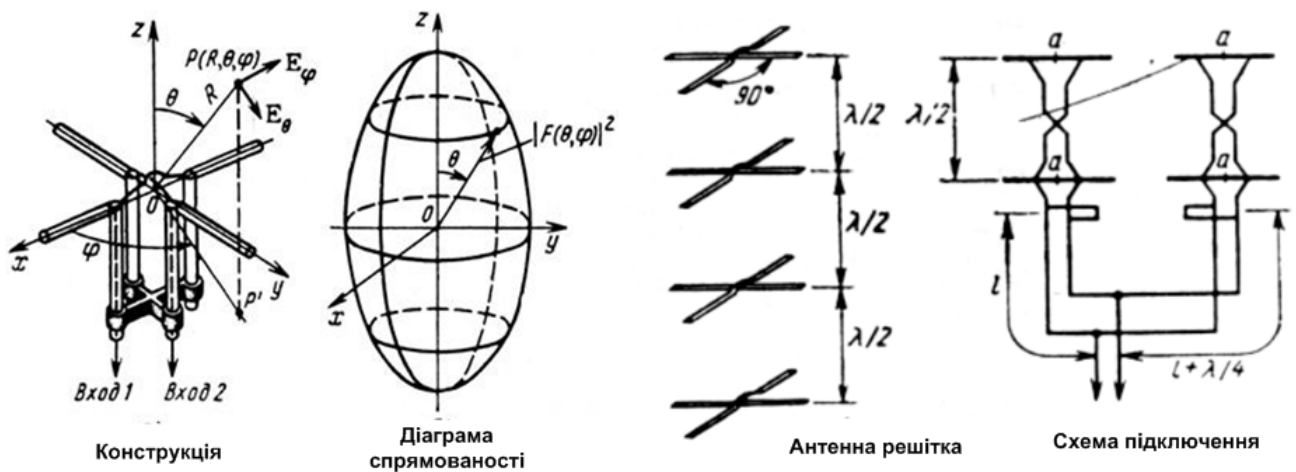


Рисунок 3.7 - Особливості конструкції та живлення турнікетних антен

Турнікетна антена [1] являє собою систему із двох лінійних вібраторів, що розташовано в одній площині перпендикулярно один одному. Залежно від

співвідношення фаз живлення антени можливо реалізувати різні режими роботи антени, що забезпечують різні форми діаграми спрямованості.

Найбільш застосовуваним є режим неспрямованого випромінювання, який можливо отримати через живлення окремих вібраторів за допомогою квадратурних струмів однакових амплітуд. Просторова діаграма спрямованості має вигляд еліпсоїда дещо витягнутого вздовж вісі перпендикулярній площині вібраторів. Для такого живлення нулі діаграми спрямованості відсутні, а максимуми спрямовано вздовж великої вісі еліпсоїда (рис.3.7). В напрямку максимального випромінювання поляризація лінійна, а в решті напрямків – еліптична [3].

Особливістю турнікетної антени є відсутність фазового центру. Найчастіше турнікетні антени використовуються для радіо та телемовлення. Для підвищення спрямованих властивостей в площині вібраторів використовують синфазні антенні решітки із елементарних турнікетних антен.



Рисунок 3.8 – Електрична схема живлення турнікетної антени і топологія (б) одноступінчатого кільцевого подільника потужності

Для живлення турнікетної антени в пристрої, що розробляється необхідно застосовувати подільник потужності між двома вібраторами турнікетної антени. Найбільш поширеним і простим типом подільника потужності є кільцевий

подільник. Реалізацію подільника потужності (рис.3.8) розумно виконати аналогічно дискретному фазообертачу за допомогою друкованих мікросмужкових ліній передачі в рамках модуля АФАР.

Режим біжучої хвилі в подільнику потужності реалізується через узгодження входу і виходів подільника. Він досягається за допомогою правильного вибору параметрів чвертьхвильових трансформаторів опору, що складають плечі подільника [6,8,10]. Для вхідного та вихідного опору подільника у 50Ом, значення хвильового опору вихідних ланок має складати

$$Z_{xв2} = Z_{xв3} = \sqrt{2}Z_{xв} = \sqrt{2} \cdot 50 \approx 71(Ом). \quad (3.30)$$

де  $Z_{xв2} = Z_{xв3}$  - вихідні опори подільника потужностей;

$Z_{xв}$  - вхідний опір фазозсувача турнікетної антени і входу подільника.

Під час збудження подільника з боку підсилювача потужності за умови симетрії вихідних кіл на виході чверть хвильових відрізків діють еквіпотенціальні сигнали і струм через резистор баластного навантаження не протікає, а отже і активна потужність на ньому не виділяється. Таким чином вся вхідна потужність спрямовується в антени, що підключено до двох виходів подільника.

Якщо відбувається збудження подільника з боку одного із його виходів, наприклад приймальним сигналом, то на другому виході утворюється різниця фаз, що дорівнює 180 градусів і сумарний сигнал дорівнює нулю, чим і забезпечується розв'язування двох антени в заданому діапазоні частот. Опір баластного резистора має забезпечувати рівність амплітуд для точного балансування, його значення має дорівнювати значенню диференційного опору двох ліній передачі, що живлять антени, а саме:

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

$$R_{\sigma} = 2 \times Z_{x\sigma} = 2 \cdot 50 = 100(\text{Ом}). \quad (3.31)$$

Якщо плечі кільцевого мосту збуджуються протифазними рівно амплітудними сигналами то балансування відбувається на вході подільника, енергія до збуджувача не потрапляє, а поглинається в баластному навантаженні  $R_{\sigma}$ .

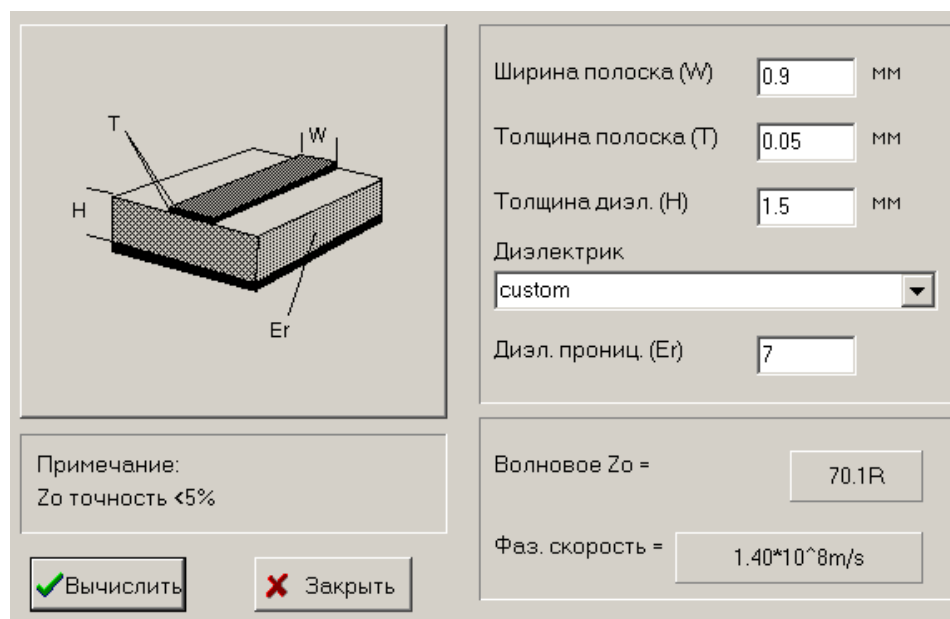


Рисунок 3.9 – Результати обчислення геометричних параметрів мікросмужки для симетричного кільцевого подільника напруги

Для забезпечення подальшого живлення турнікетної антени в одному із пліч подільника виконано 90 градусний фазообертач на основі мікросмужкових відрізків лінії передачі.

Загалом, перехідне затухання вихідних кіл такого кільцевого симетричного паралельного подільника потужності не менше 20 дБ в діапазоні частот із коефіцієнтом перекриття 1,4, що набагато перевищує діапазон використовуваних частот субмодуля за ТЗ. При цьому коефіцієнт стоячої хвилі в каналах не перевищує 1,2, а прохідне затухання змінюється незначно від 3,02 до 3,09дБ.

За умови використання матеріалів та технологій виготовлення мікросмужкових елементів [18] аналогічних розробці дискретного фазообертача товщина мікросмужки подільника для узгодження приблизно вдвічі менша (рис.3.9), а довжина чверть хвильового відрізка залишається незмінною.

### 3.4 Оцінювання надійності виробу

Надійність виробу оцінюється на базі різноманітних показників, найбільш поширеним серед яких оцінювання надійності під час експлуатації після проведення тестових випробувань та перед появою відмов, що пов'язані із старінням. [22]. Періоду нормальної експлуатації відповідає експоненціальний закон цільності розподілу відмов, основним показником якого є відмови компонент  $\lambda$ . Вважається, що відмови компонент працюють таким чином, що відмова одного компоненту призводить до відмови всього пристрою, тобто застосовується послідовна схема відмов [23].

Вихідними даними для розрахунків є принципова схема із переліком компонент, електричні, кліматичні та режими роботи складових схеми, а також рівень механічних навантажень на пристрій загалом. Інтенсивності відмов визначаються за паспортними даним, або відповідно аналогам.

Загальне значення інтенсивності раптових відмов підчас нормальної експлуатації обраховується наступним чином [24]:

$$\lambda_{\Sigma \text{ мод}} = \sum_{i=1}^N \lambda_{0i} k_{1i} k_{2i} k_{3i} \alpha_i (T, K_n), \quad (3.32)$$

де  $\lambda_{0i}$  - номінальна інтенсивність відмов  $i$ -го елементу, 1/год;

$k_{1i}$  - коефіцієнт, що обумовлює погіршення інтенсивності відмов під час дії вібрації та ударів, для бортової професійної апаратури  $k_{1i} = 1,5$ ;

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

$k_{2i}$  - коефіцієнт, що обумовлює збільшення інтенсивності відмов від дії вологості та температури, для умов  $t=-45+45$  °С та вологості у 40-90% встановлюється  $k_{2i} = 4,2$ ;

$k_{3i}$  - коефіцієнт впливу несприятливих умов відповідно впливу змін та діапазону атмосферного тиску, встановимо для бортової апаратури  $k_3=1,4$ ;

$\alpha_i(T, K_n)$  - додатковий поправочний коефіцієнт, що враховує локальні теплові та електричні перевантаження елемента

$N$  - загальна кількість компонент у розроблювальному модулі.

Таблиця 3.3 – Калькуляція інтенсивності відмов компонент субмодуля

№	Назва групи елементів	Кількість, шт	Інтенсив. відмов $\lambda_0 \times 10^{-6}$	Коеф. навантаж. $\alpha_i(T, K_n)$	Відмови групи, 1/год $\times 10^{-6}$
1	Транзистори УВЧ (MRF15030)	3	0,180	0,59	0,31
2	Діоди НВЧ (2A503A)	12	0,21	0,59	1,49
3	Конденсатори (ММХ-Е)	12	0,022	0,5	0,13
4	Дроселі (планар)	12	0,033	0,5	0,20
5	Резистори (RC02)	2	0,034	0,6	0,04
6	Роз'язтя інтерфесні	3	0,015	1,0	0,05
7	Плата друкована	2	0,7	1,0	1,4
8	Точки пайки	67	0,005	1,0	0,335
9	Джгутові з'єднання	6	0,01	1,0	0,06
	Всього	119			4,015

\* Кількість компонент обрана із розрахунку 3-каскадного підсилювача.

Для пристрою, що розробляється, елементи принципової схеми зібрані в одному корпусі, тому більшість коефіцієнтів (3.32) є однаковими та їх можливо винести за знак суми. Вираз (3.32) в такому випадку спрощується до :

$$\lambda_{\Sigma \text{ мод}} = k_1 k_2 k_3 \sum_{i=1}^N \lambda_{0i} \alpha_i (T, K_n), \quad (3.33)$$

Зауважимо, що сучасні елементи мають низькі інтенсивності відмов порівняно із більш застарілими, тому під час оцінювання параметрів надійності можливо отримати ще більш якісніші значення параметрів, що її характеризують [24].

Враховуючи коефіцієнти подані у (3.32) сумарна інтенсивність відмов модуля оцінюватиметься як:

$$\begin{aligned} \lambda_{\Sigma \text{ мод}} &= k_1 k_2 k_3 \sum_{i=1}^N \lambda_{0i} \alpha_i (T, K_n) = \\ &= (1,5 \times 4,2 \times 1,4 \times 4,015) \times 10^{-6} = 35,4 \times 10^{-6} (1/\text{год}), \end{aligned} \quad (3.34)$$

а середній термін напрацювання на відмову для експоненційного закону розподілу відмов обчислюється як обернена величина на відмову модуля АФАР і складає:

$$\begin{aligned} T_{\text{сер}} &= 1/\lambda_{\Sigma \text{ мод}} = 1/35,4 \times 10^{-6} = \\ &= \frac{1}{(1,5 \times 4,2 \times 1,4 \times 4,015) \times 10^{-6}} \cong 28000 (\text{год}), \end{aligned} \quad (3.35)$$

що значно перевищує обмеження задані у ТЗ.

Якщо вважати заданий в ТЗ термін експлуатації у 1000 годин як гарантований термін працездатності типових пристроїв в рамках АФАР, то відповідно експоненційному закону розподілу ймовірностей , ймовірність безвідмовної роботи складає:

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

$$P_T = \exp \left\{ -\frac{T_{TЗ}}{T_{сер}} \right\} = \exp \left\{ -\frac{1000}{28000} \right\} = 0,964. \quad (3.36)$$

Таким чином, висновком є відповідність параметрів надійності вимогам ТЗ. Для модуля АФАР найбільш критичною групою елементів за надійністю є група надвисокочастотних перемикальних діодів дискретного фазообертача (див. табл. 3.3).

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз використання складних антенних систем, являють собою фазовані антенні решітки. Розглянуто принцип їх дії, тактичні переваги, топологічні конструкції, способи живлення активних вібраторів та принципи керування діаграмою спрямованості. Вказано, що найбіль перспективними серед таких складних антенних конструкцій є активні фазовані антенні решітки, що будуються за модульним принципом, де головним елементом є приймально-передавальний модуль. Розроблено технічну пропозицію для проектування передавального субмодуля таких решіток.

2. Розглянуто способи структурної будови активних фазованих антенних решіток в аспектах побудови пристроїв керування фазовим зсувом та ультрависокочастотних підсилювачів потужності субмодулів. Визначено, що найбільш перспективним є побудова приймальних субмодулів на базі мікросмужкових ліній передачі, що задовольняє потребам основних складових таких решіток – дискретних фазообертачів та підсилювачів потужності, що реалізуються на ультрависокочастотних напівпровідникових елементах.

3. Під час проведення технічних розрахунків обрана напівпровідникова елементна база, матеріали та напівфабрикати для виготовлення плат дискретного три ланкового прохідного фазообертача в діапазоні ультрависоких частот. Проведено структурний аналіз та технічні розрахунки фазообертача на основі мікросмужкових ліній передачі, а також схемотехнічний інженерний розрахунок ультрависокочастотного каскаду підсилення середньої потужності та системи живлення турнікетної антени.

4. Розроблено схему електричну структурну, функціональну та схему електричну принципову високочастотного субмодуля багатоелементної антени. Представлено ескізи робочих креслень окремих складових розробленої конструкції.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник/ За ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського, В.І.Правди. – К.: Вища шк., 1999. – 838 с.
2. Прудіус І.Н. Основи антенної техніки: Навч. посібник. – Львів, 2000. – 224 с.
3. Mailloux R.J. Phased Array Antenna Handbook. Boston, London Artech House, 1994.
4. Цалієв Т.А. Антени: навч. посіб. з практичних занять / Цалієв Т.А. – Вид-во Одеса: ОНАЗ ім О.С. Попова, 2015. – 176 с.
5. Антенні пристрої засобів зв'язку: навч. посібник / А.П. Заїкін, О.О. Зеленський, О.В. Троцький та ін. –Харків, 2003. – 523 с.
6. Волощук Ю.І. Сигнали та процеси у радіотехніці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів, т.1, — Харків: «Компанія СМІТ», 2003. — 580 с.
7. Balanis C.A Antenna theory: analysis and design / C. A. Balanis. – N.Y.: John Wiley and Sons, 1992. – 941 p.
8. Ільницький Л.Я., Савченко О.Я., Сібрук Л.В. «Антени та пристрої надвисоких частот»: Підручник для ВНЗ/ За ред. Л.Я. Ільницького. –К: Укртелеком, 2003. – 496с.
9. Balanis C.A. Antenna Theory Analysis. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2005.1073p.
10. Ільницький Л.Я., Сібрук Л.В., Щербина О.А. «Пристрої надвисоких частот та антени»: Навч. посібник. –К: НАУ, 2013. – 188с.
11. Ільницький Л.Я., Сібрук Л.В., Слоболлдянюк П.В., Благодарний В.Г. «Антени телекомунікаційних та моніторингових систем», За ред Л.Я. Ільницького. – К., 2012. – 240 с.
12. Blake L.V. Radar Range-Performance Analysis [Text] / L.V. Blake. –Dedham: Artech House, 1986. – 342 p.
13. Barton D. K. Radar Equations for Modern Radar [Text] / D.K. Barton. – Norwood: ARTECH HOUSE, 2013. – 427 p.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

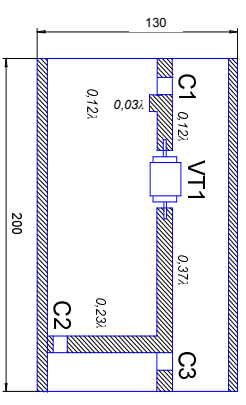
- 
14. Елементна база радіоелектронної апаратури: Пасивні радіокомпоненти В 4 ч. Ч. 1. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В.О.Піддубний, І.О.Товкач. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,05 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 98 с.
  15. Троцишин І.В. Фізичні основи електронних приладів: Навч. посібник / І.В.Троцишин – Хмельницький: ХДУ. – 2004. – 488 с.
  16. Швець Є.Я. Матеріали і компоненти електроніки: навч. посібник /Є.Я.Швець, І.Ф.Червоний, Ю.В.Головко – Запоріжжя, ЗДІА, 2011. – 278 с.
  17. Дмитренко В. П. Пристрої НВЧ. Основи теорії: Монографія /Дмитренко В. П., Бугрова Т. І., Логачова Л. М. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. –280 с.
  18. Zhurbenko V. Passive microwave components and antennas. Vukovar,Croatia: In-Teh, 2010. 556 p.
  19. Mazur K.S. Filters based on segments of microstrip lines / K.S. Mazur, D.D. Tatarchuk, Y.V. Didenko, and A.O. Serheieva // Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018): Proc. of 38th Int. Sci. Conf. (April 24 – 26, 2018, Kyiv, Ukraine). – Kyiv, 2018.
  20. Василенко І.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: навч. посібник. / І.І.Василенко, В.В.Широков, Ю.І.Василенко. – Львів: «Магнолія-2006», 2009. – 242 с.
  21. Іванов В.О., Габрусенко Є.І. Лінії передачі та резонансні системи в діапазоні надвисоких частот: Конспект лекцій. – К.: КМУЦА, 2000.- 64 с.
  22. Васілевський О.М., Гриценко Ю.В. Нормування показників надійності технічних засобів. Навч. посібник .Вінниця: ВНТУ, 2013р., 160 с.
  23. ДСТУ 3004-95. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. К.: Держстандарт України, 1995. – 123 с.
  24. Федун І.В. Основи теорії надійності та контролю якості виробів електронної техніки: Лабораторний практикум. Вінниця: ВДТУ, 2003р., 71 с.

					КПТР 2018002.01.14.00ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

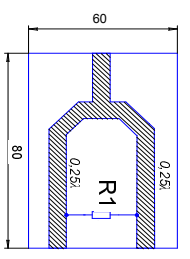


ZL007.10.2018002.01.14.0012

Топографічна схема підключення трансформатора підключувального каскаду



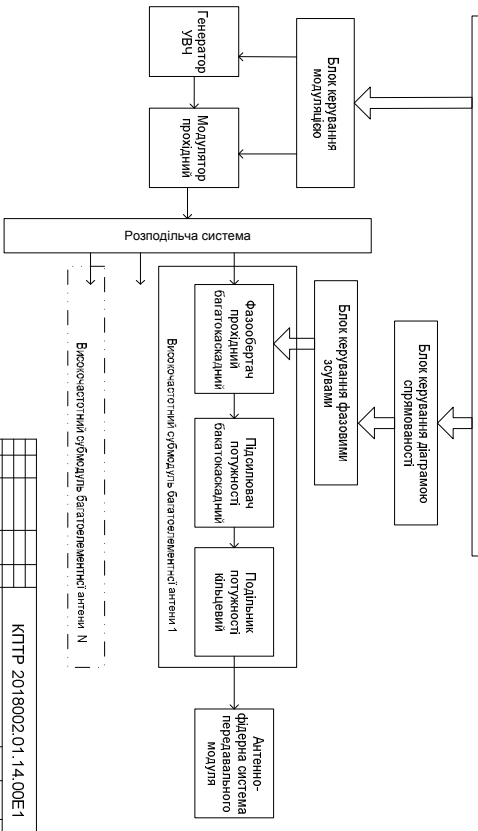
Топографічна схема розташування ключового підсилювача потужності



№№ № розп.	Підпис і дата	Взам. №№ №	№№ № дубл.	Підпис і дата
<p>Елементи мікромодуля</p> <p>топологія передавального модуля</p> <p>Блок керування фазовими</p> <p>Трансформатор</p> <p>Технічна схема</p>				
№№ № розп.	Підпис і дата	Взам. №№ №	№№ № дубл.	Підпис і дата
<p>КІТР 2018002.01.14.0012</p> <p>ЛР: Чл. Клас. Категорія</p> <p>У: 1:1</p> <p>ХНУ ФІТ</p>				

ZL007.10.2018002.01.14.00E1

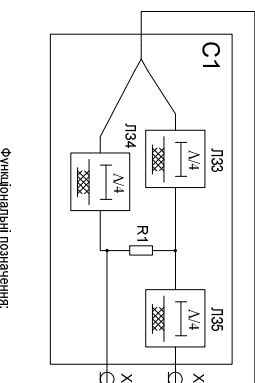
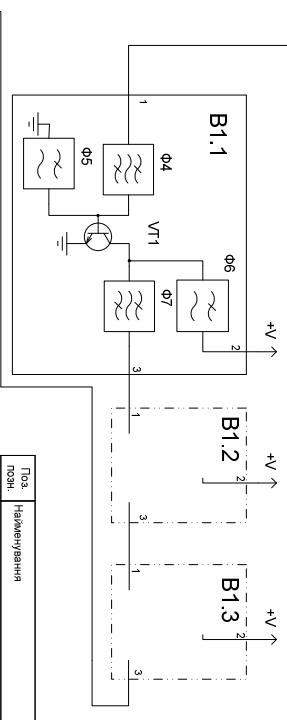
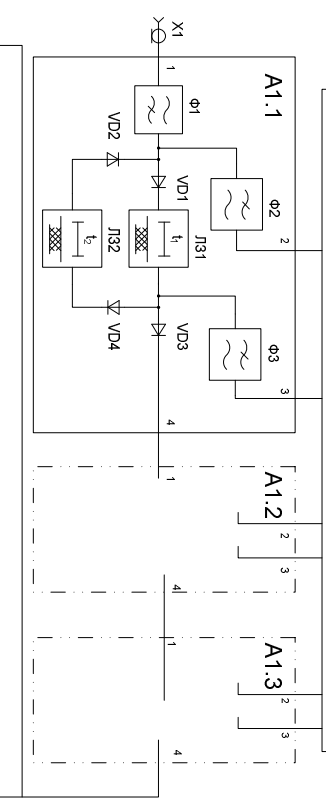
Центр керування антеною реєлюкою



№№ № розп.	Підпис і дата	Взам. №№ №	№№ № дубл.	Підпис і дата
<p>Високочастотний сиринг для багатоканальної антени N</p>				
<p>КІТР 2018002.01.14.00E1</p> <p>Передавальний модуль ФАР</p> <p>Схема передавального модуля</p> <p>Технічна схема</p>				
№№ № розп.	Підпис і дата	Взам. №№ №	№№ № дубл.	Підпис і дата
<p>КІТР 2018002.01.14.00E1</p> <p>ЛР: Чл. Клас. Категорія</p> <p>У: 1:1</p> <p>ХНУ ФІТ</p>				

ZL007.10.2018002.01.14.00E2

Інтерфейс керування фазоворотним



Функціональні позначення:

Фільтри:

Ф1- Фільтр глибокої частоти вхідний коливальний;

Ф2-Ф3 – Фільтр живильних сигналів керування фазоворотними коливальними;

Ф4 – Фільтр відбитого сигналу підсилювача мікромодуля;

Ф5 – Фільтр замирення базового кола підсилювального трансформатора;

Ф6 – Фільтр живильного кола підсилювального трансформатора;

Ф7 – Фільтр відбитого сигналу підсилювача мікромодуля;

Ф8 – Фільтр відбитого сигналу підсилювача мікромодуля;

Лінійні затримки:

Л31- Л32 – Мікромодуль лінійної затримки дивізіон ХОДУ (45° мн. 500м);

Л33- Л34 – Мікромодуль лінійної затримки дивізіон (750м);

Л35 – Мікромодуль лінійної затримки дивізіон (600м);

№№ № розп.	Підпис і дата	Взам. №№ №	№№ № дубл.	Підпис і дата
<p>КІТР 2018002.01.14.00E2</p> <p>Високочастотний сиринг для багатоканальної антени</p> <p>Схема передавального модуля</p> <p>Технічна схема</p>				
№№ № розп.	Підпис і дата	Взам. №№ №	№№ № дубл.	Підпис і дата
<p>КІТР 2018002.01.14.00E2</p> <p>ЛР: Чл. Клас. Категорія</p> <p>У: 1:1</p> <p>ХНУ ФІТ</p>				

Поз. позн.	Найменування	ЦХ	Примітка
X1-X2	Фазоворотні коливальні	3	ЕВСТО
A1	Лінійні затримки	3	
VD1-VD4	Діоди напівпровідникові VD1-KS330	4	Моторол
B1	Каскад підсилювальний лінійно-фазовий	3	
VT1	Транзистор УПТ/радіомікросхемний УПТ15030	1	Моторол
C1	Блок керування фазовими	1	
R1	Резистор РС-212 - 100 Ом-1%	1	Несвіт АС



# КОНТРОЛЬ ПЛАГИАТУ



Имя пользователя:  
Kafedra TMIT KhNU  
Дата проверки:  
23.05.2022 23:47:23 EEST  
Дата отчета:  
24.05.2022 00:02:31 EEST

ID проверки:  
1011310098  
Тип проверки:  
Doc vs Internet  
ID пользователя:  
100005657

Название файла: **Ионов\_TP-18**

Количество страниц: 59    Количество слов: 10035    Количество символов: 78946    Размер файла: 1.18 MB    ID файла: 1011197533

## 0.7% Совпадения

Наибольшее совпадение: 0.2% с Интернет-источником (<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/79995>)

0.7% Источники из Интернета    122 ..... Страница 61

Поиск совпадений с Библиотекой не производился

## 0% Цитат

Не найдено ни одной цитаты

Не найдено ни одной ссылки

## 0% Исключений

Нет исключенных источников

## Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы    7

Tue May 24 08:37:30 EEST 2022, Стецюк Віктор Іванович, Хмельницький національний університет, ХНУ

## Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 2.0%

Словари проверки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Ошибок в документах: 12%

ID: 103860 Название: Високочастотний субмодуль багатоеlementної антени Добавлено в БД: 2022-05-24 Авторы: Іонов Павло Вадимович Руководители: Пивовар Олег Сергійович Консультанты: Опоненты:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	58772	867	1467 (2%)	25 (3%)

### Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

РІШЕННЯ КАФЕДРИ

**ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Високочастотний субмодуль багатоелементної антени

Автор: **Іонов Павло Вадимович**

Спеціальність: **172 Телекомунікації та радіотехніка**

Освітня програма: Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: **к.т.н., доц. Пивовар Олег Сергійович**

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<b><u>Відповідає</u></b>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: Запозичення у розмірі 0,7%, виявлені в роботі є випадковими і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.

01.06.2022р.

Керівник проєкту:



Олег ПИВОВАР

Зав. каф. ТМІТ



Сергій ПІДЧЕНКО

## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційний проект студента групи ТР1-18-1

Іонова Павла Вадимовича

«Високочастотний субмодуль багатоеlementної антени»

Зважаючи військовий стан в Україні питанням розробки високотехнологічних радіотехнічних засобів має бути приділено максимум уваги, що підтверджує актуальність проведення подібних розробок – проектування випромінювальних субмодулів активних фазованих антенних решіток.

Пояснювальна записка кваліфікаційного проекту бакалавра складається із вступу, 3 розділів, висновків з виконання проекту, списку використаних джерел (24) та додаткових матеріалів у кінці звіту. Загальний обсяг роботи в якому викладено основний зміст складає 57 сторінок. Графічна частина представлена 2 аркушами креслень формату А1 із необхідними документами супровіду.

Перевагами кваліфікаційного проекту є ґрунтовна оглядова частина для раціонального вибору схемотехнічних рішень, правильність електричних розрахунків, акуратність та технічна грамотність викладання суті розробки на основі державних стандартів, а також використання анґломовних літературних джерел посилань.

Однак в роботі присутні ряд неточностей, частково порушені посилання на ілюстрації, перекручено окремі наукові терміни. Особливістю проекту є виконання проектування в діапазоні гігагерцових частот із активною елементною базою на основі слабкосигнальних S-параметрів.

Загалом кваліфікаційний проект повністю відповідає вимогам до дипломних робіт бакалаврів та заслуговує на оцінку “ВІДМІННО”.

Рецензент:

Зав.каф.АКІТ, д.т.н., проф.



Валерій МАРТИНЮК

4.06.2022р.

Відгук керівника  
на кваліфікаційний проект студента групи ТР1-18-1

Іонова Павла Вадимовича

«Високочастотний субмодуль багатоелементної антени»

Студент 4-го курсу Іонов П.В. під час роботи над кваліфікаційним проектом провів структурно-схемотехнічний аналіз та розробку частини ескізної конструкторської документації із проектування пристрою перспективного та високотехнологічного напрямку – побудови надскладних багатоелементних антенних систем, що може бути застосовано у активних фазованих антенних решітках як радіозасобів телекомунікацій так і радіозасобів добування та руйнування інформації оточуючого електромагнітного поля, що є вирішальним під час військового вторгнення ворога на територію України.

Під час проектування окрема увага зосередилась на обґрунтуванні та технічних розрахунках щодо проектування мікросмужкових фазообертачів та ультрависокочастотних підсилювачів потужності. Представлена конструкторська документація у вигляді структурних та принципівих схем та топологій планарного виконання.

В проекті наведено ряд коректно проведених оціночних, технічних та електричних розрахунків, що торкаються роботи пристрою в зоні ультрависоких частот, а також обґрунтування вибору певних технічних рішень для реалізації. Текст пояснювальної записки логічно пов'язаний та викладено технічно грамотно. Робота проводилась за активної взаємодії із керівником, в роботі використані виключно україномовні та англійськомовні джерела посилань. Пояснювальна записка та графічна частина оформлені набагато раніше, визначеного терміну, що говорить про високий рівень та завчасність підготовки до дипломного проектування студентом.

Вважаю, що кваліфікаційний проект заслуговує оцінки «Відмінно».

Керівник проекту:

01.06.22р

к.т.н., доц. каф. ТМІТ



Олег ПИВОВАР

Завідувачу кафедри  
телекомунікацій, медійних та  
інтелектуальних технологій (ТМІТ)

Підченко С.К.  
здобувача вищої освіти  
студента 4 курсу, гр. ТР1-18-1  
Іонова Павла Вадимовича

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційного проекту до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщена та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

01.06.22р

дата



підпис

Іонов П.В.

# Тема кваліфікаційного проєкту бакалавра:

1

## «Високочастотний субмодуль багатоелементної антени»

**Автор проєкту:** Іонов Павло Вадимович.

**Керівник проєкту:**

канд. техн. наук, доц. Пивовар Олег Сергійович.

**Пояснювальна записка:** 57 сторінок, 23 рисунки, 7 таблиць, 24 джерела, 1 додаток.

**Графічна частина:** 4 креслення, 9 презентаційних слайдів.

**Метою кваліфікаційного проєкту бакалавра є розробка високочастотного модуля у складі передавальних фазованих антенних решіток діапазону ультрависоких частот.**

### АНТЕННІ РЕШІТКИ (АР)

2

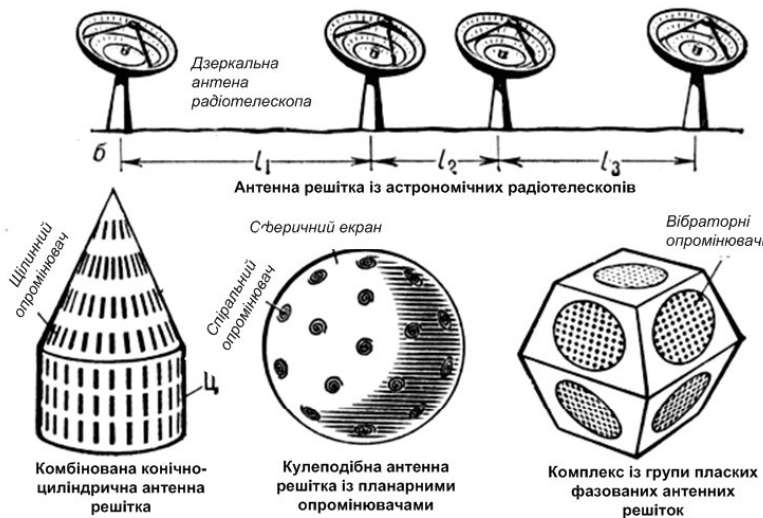


Рисунок 1 – Комплекси антенних решіток

**Основні переваги АР:**

1. Покращення спрямованих властивостей.
2. Електронне сканування променем простору.
3. Створення багатопроменевої діаграми.

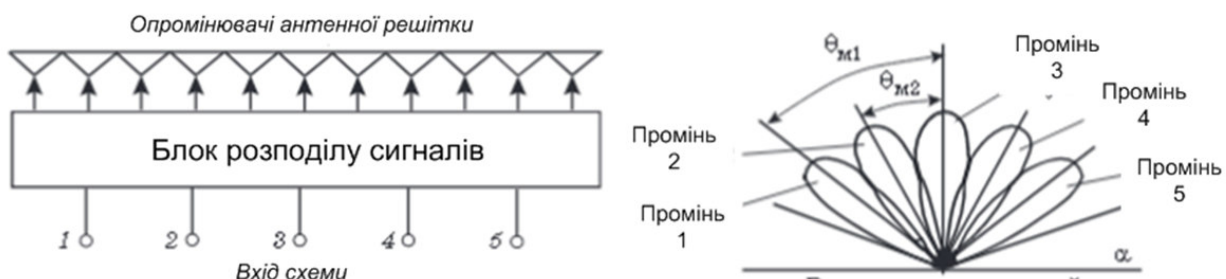


Рисунок 2 – Багатопроменеві антенні решітки

# ОПРОМІНЮВАЧІ ТА ЇХ ЖИВЛЕННЯ

3

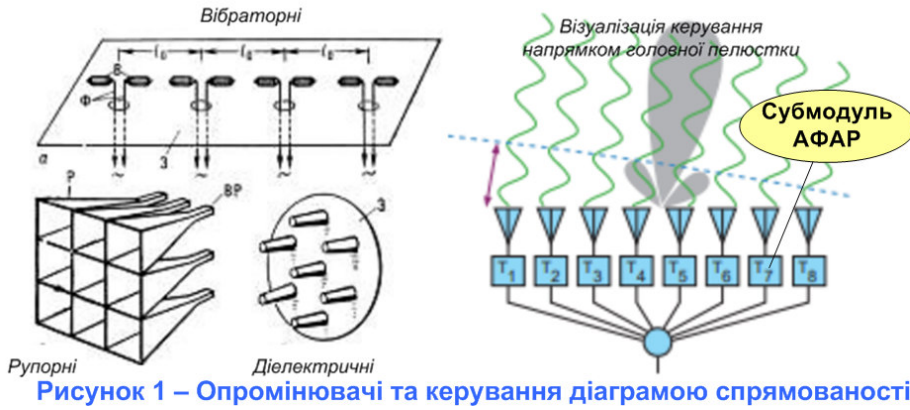


Рисунок 1 – Опромінювачі та керування діаграмою спрямованості

Найбільш ефективна реалізація переваг АР:  
 1. Забезпечення регулювання фази опромінювачів (ФАР).  
 2. Підсилення (обробка сигналі) в складі каналів опромінювачів (АФАР).  
 3. Амплітудно-фазове керування сигналом опромінювача (АФАР)

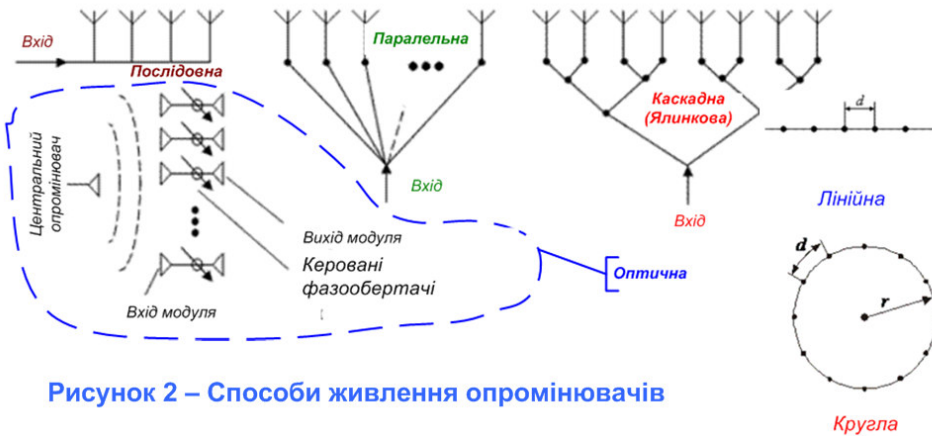


Рисунок 2 – Способи живлення опромінювачів

Рисунок 3 – Геометрії розташування опромінювачів

# КОНСТРУКЦІЯ ТА СХЕМОТЕХНІКА МОДУЛІВ АФАР

4

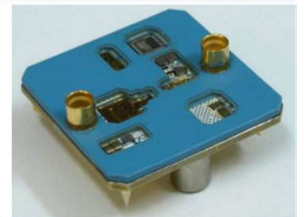
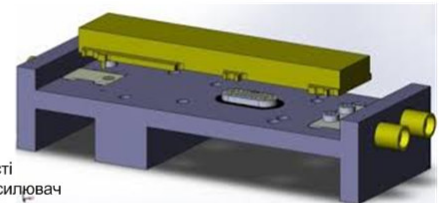
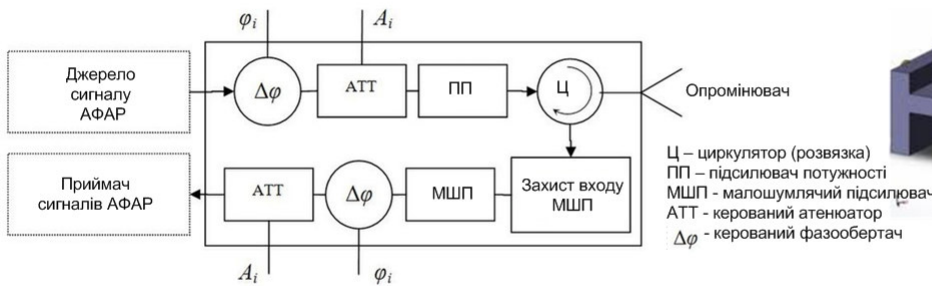


Рисунок 1 – Структура схема модуля АФАР

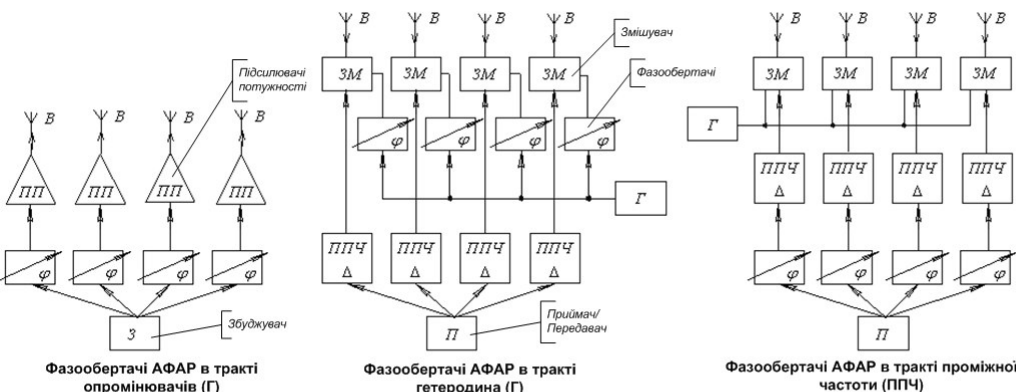


Рисунок 3 – Способи керування фазами опромінювачів

Рисунок 2 – Об'ємна (вверху) та планарна (внизу) конструкція модулів АФАР

# КЕРУВАННЯ ФАЗОВИМ ЗСУВОМ МОДУЛІВ АФАР

5

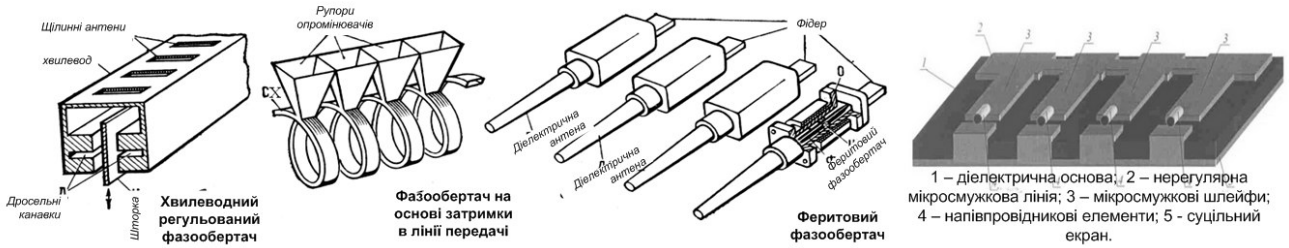


Рисунок 1 - Конструкції фазообертачів для АФАР

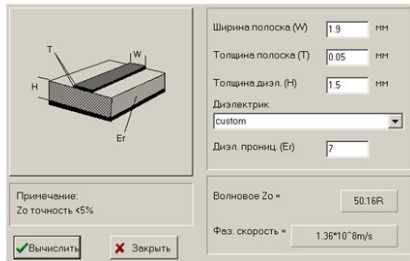


Рисунок 3 - Автоматизований розрахунок хвильового опору мікросмужкової лінії фазообертача

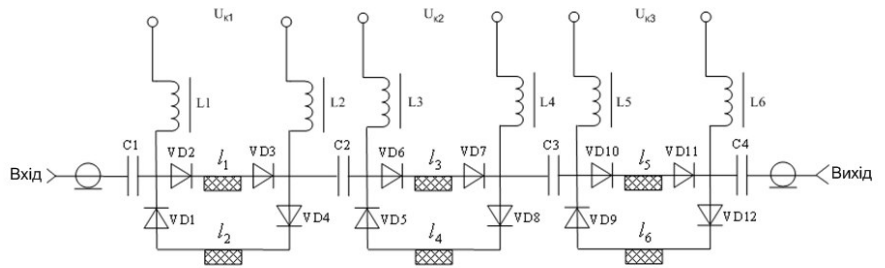


Рисунок 2 – Принципова схема прохідного фазообертача на мікросмужкових лініях із параферзним керуванням

# ПІДСИЛЮВАЧ ПОТУЖНОСТІ СУБМОДУЛЯ

6

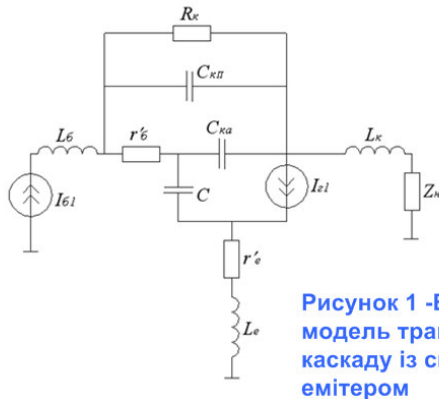


Рисунок 1 - Високочастотна модель транзисторного каскаду із спільним емітером

Таблиця 1 – Основні параметри транзистора MRF15030

№	Назва	Розмірність	Значення
1	Мінімальна рекомендована робоча частота	ГГц	1,0
2	Максимальна рекомендована робоча частота	ГГц	2,0
3	Вихідна потужність	Вт	до 30
4	Мінімальний коефіцієнт підсилення за потужністю	дБ	9
5	Рекомендована робоча напруга живлення	В	26

Таблиця 2 – Результати розрахунку вихідного каскаду

№	Назва	Розмірність	Значення
1	Оцінка коефіцієнта підсилення	дБ	12,4
2	Опір кола втрат колектора	Ом	14,5
3	Крутизна передачі струму	см	0,72
4	Коефіцієнт використання	-	0,4
5	Напруга першої гармоніки, амплітуда	В	10
6	Струм першої гармоніки, амплітуда	А	6
7	Приведений еквівалентний опір навантаження	Ом	3,2
8	Струм бази (амплітуда)	А	1,6
9	Коефіцієнт підсилення струму бази	-	3,2
10	Коефіцієнт підсилення потужності	-	7
11	Постійна складова струму колектора	А	4,6
12	Споживана потужність	Вт	100
13	Коефіцієнт корисної дії	%	28
14	Вихідна потужність	Вт	30

# ПОДІЛЬНИК ПОТУЖНОСТІ СУБМОДУЛЯ

7

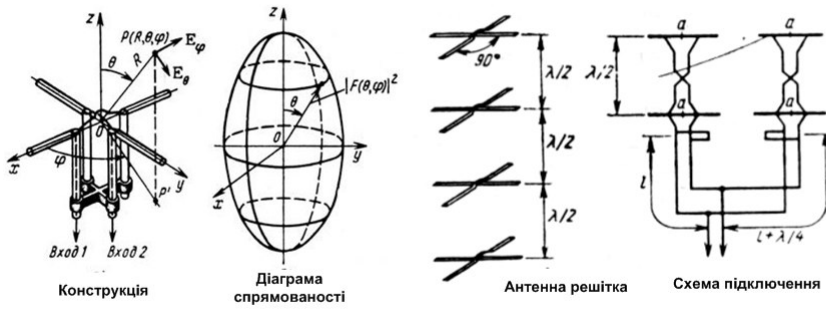


Рисунок 1 - Особливості конструкції та живлення турнікетних антен

Таблиця 1 – Результати розрахунку подільника потужності

№	Назва	Розмірність	Значення
1	Вхідний та вихідний опори	Ом	50
2	Прохідне затухання	дБ	3,2...3,4
3	Перехідне затухання	дБ	21дБ
4	Опір баластного резистора	Ом	100
5	Опір ділянок поділу потужності	Ом	71
6	Коефіцієнт стоячої хвилі	дБ, не більше	1,2

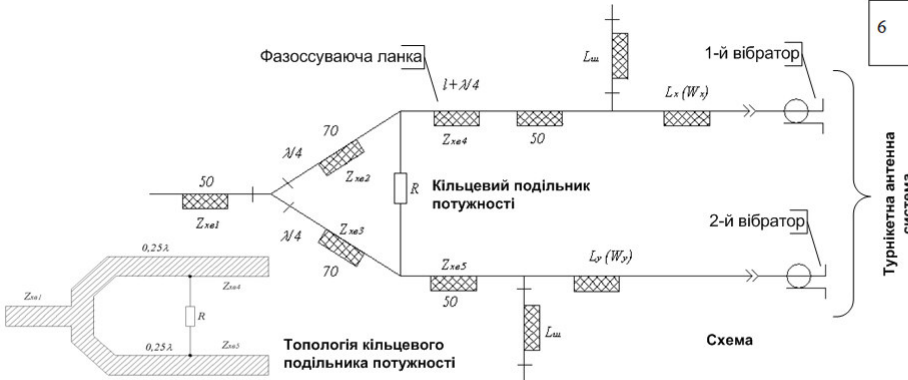


Рисунок 2 – Схемотехніка та топологія подільника потужності

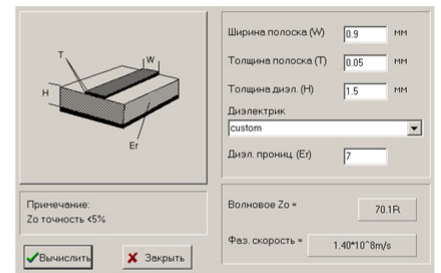


Рисунок 3 – Розрахунок опору мікросмужкових ділянок поділу потужності

# ПАРАМЕТРИ НАДІЙНОСТІ СУБМОДУЛЯ ЗА РАПТОВИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВІДМОВАМИ

8

Таблиця 1 – Калькуляція інтенсивностей відмов субмодуля

№	Назва елементів	групи	Кількість, шт	Інтенсив. відмов $\lambda_0 \times 10^{-6}$	Коеф. навагаж $\alpha_i(T, K_n)$	Відмови групи, $1/\text{год}$ $\times 10^{-6}$
1	Транзистори (MRF15030)	УВЧ	3	0,180	0,59	0,31
2	Діоди (2A503A)	НВЧ	12	0,21	0,59	1,49
3	Конденсатори (ММХ-Е)		12	0,022	0,5	0,13
4	Дроселі (планар)		12	0,033	0,5	0,20
5	Резистори (RC02)		2	0,034	0,6	0,04
6	Роз'язиття інтерфесні		3	0,015	1,0	0,05
7	Плата друкована		2	0,7	1,0	1,4
8	Точки пайки		67	0,005	1,0	0,335
9	Джгутові з'єднання		6	0,01	1,0	0,06
	Всього		119			4,015

Розрахункове співвідношення

$$\lambda_{\Sigma \text{ мод}} = k_1 k_2 k_3 \sum_{i=1}^N \lambda_{0i} \alpha_i(T, K_n)$$

Таблиця 2 – Коефіцієнти впливу зовнішніх факторів

№	Коефіцієнт умов використання	Значення
1	Вплив вологості та температури	4,2
2	Вплив змін атмосферного тиску	1,4
3	Вплив вібрацій та ударів	1,5

Середній час напрацювання на відмову

$$T_{\text{сер}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma \text{ мод}}} = \frac{1}{35,4 \times 10^{-6}} = \frac{1}{(1,5 \times 4,2 \times 1,4 \times 4,015) \times 10^{-6}} \cong 28000 (\text{год})$$

### Таблиця 1 -Технічні

№	Найменування параметру	Одиниці виміру	Значення параметру	Примітки
1	Середня робоча частота	ГГц	1,1	
2	Ширина спектру частот	МГц	40	не більше
3	Кількість дискретів фазообертача	шт	6	не менше
4	Крок дискретів фазообертача	градус	45	
5	Коефіцієнт підсилення за потужністю	дБ	20	не менше
6	Коефіцієнт корисної дії модуля	%	30	не менше
7	Вихідний хвильовий опір у смузі робочих частот	Ом	50	+/-5
8	Вихідний хвильовий опір у смузі робочих частот	Ом	50	+/-5
9	Напруга живлення модуля	В	26	резервна
10	Загальний струм споживання,	А	3	не більше
11	Різновид модуляції сигналу		фазова	частотна

### Таблиця 2 - Конструкторські

№	Найменування параметру	Одиниці виміру	Значення параметру	Примітки
1	Середнє значення робочої температури	0С	10	
2	Діапазон робочих температур	0С	-45...+45	не більше
3	Середній час напрацювання на відмову	год	1000	не менше
4	Гарантований термін служби	рік	5	
5	Тип електрорадіомонтажу		комбінований	об'ємний та друкований
6	Час відновлення працездатності під час ремонту	год	8	не більше
7	Спосіб охолодження	В	Теплопередача	
8	Кліматичне виконання		відкритому повітрі	
9	Моніторинг кліматичних умов		загальний, з боку модуля	

## ВИСНОВКИ

**10**

1. Проведено аналіз використання складних антенних систем, являють собою фазовані антенні решітки. Розглянуто принцип їх дії, тактичні переваги, топологічні конструкції, способи живлення активних вібраторів та принципи керування діаграмою спрямованості. Вказано, що найбільш перспективними серед таких складних антенних конструкцій є активні фазовані антенні решітки, що будуються за модульним принципом, де головним елементом є приймально-передавальний модуль. Розроблено технічну пропозицію для проектування передавального субмодуля таких решіток.

2. Розглянуто способи структурної будови активних фазованих антенних решіток в аспектах побудови пристроїв керування фазовим зсувом та ультрависокочастотних підсилювачів потужності субмодулів. Визначено, що найбільш перспективним є побудова приймальних субмодулів на базі мікросмужкових ліній передачі, що задовольняє потребам основних складових таких решіток – дискретних фазообертачів та підсилювачів потужності, що реалізуються на ультрависокочастотних напівпровідникових елементах.

3. Під час проведення технічних розрахунків обрана напівпровідникова елементна база, матеріали та напівфабрикати для виготовлення плат дискретного три ланкового прохідного фазообертача в діапазоні ультрависоких частот. Проведено структурний аналіз та технічні розрахунки фазообертача на основі мікросмужкових ліній передачі, а також схемотехнічний інженерний розрахунок ультрависокочастотного каскаду підсилення середньої потужності та системи живлення турнікетної антени.

4. Розроблено схему електричну структурну, функціональну та схему електричну принципову високочастотного субмодуля багатоелементної антени. Представлено ескізи робочих креслень окремих складових розробленої конструкції.