

Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інформаційних електронних систем  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

**Бакалаврська дипломна робота на тему:**

**«Резонансна хвилевідно-щілинна антена з синфазним збудженням щілин»**

Виконав: студент 4-го курсу, групи ТКР-196  
спеціальності 172 – «Телекомунікації та ра-  
діотехніка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Kib-

Криштофор Я. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІРТС

Воловик А.Ю.

Воловик А.Ю.

(прізвище та ініціали)

« 19 » 06 2023 р.

Рецензент: к.т.н., професор каф. ІКСТ

Бортник Г.Г.

Бортник Г.Г.

(прізвище та ініціали)

« 20 » 06 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осалчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 20 » 06 2023 р.

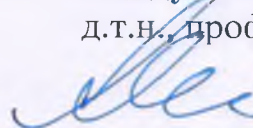
Вінниця ВНТУ - 2023 рік

Вінницький національний технічний університет  
Факультет Інформаційних електронних систем  
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації  
Спеціальність – 172 – «Телекомунікації та радіотехніка»  
Освітньо-професійна програма – «Радіотехніка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ІРТС**

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

 21.03.2023 року

### **ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Криштофору Ярославу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Резонансна хвилевідно-щілинна антена з синфазним збудженням щілин

керівник роботи к.т.н., доц., доцент кафедри ІРТС Воловик А.Ю.  
затвердені наказом вищого навчального закладу від "20" 03 2023 року № 67





2. Строк подання студентом роботи 19 06 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: робочий діапазон частот від 4,1 до 4,5 ГГц; коефіцієнт підсилення дорівнює 100; коефіцієнт стійкої хвилі в фідері не більше ніж 1,2; потужність, яка підводиться до антени, дорівнює 1,0 Вт; прийняти рівноамплітудне лінійно-фазове збудження по антені.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Загальні відомості про антени. Розрахунок хвилеводно-щілинної антени. Дослідження хвилеводно-щілинної антени. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки, Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): класифікація антен, види щілин в резонансній хвилевідно-щілинній антені, діаграми спрямованості хвилевідно-щілинної антени.

## 6. Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	доцент кафедри ІРТС к.т.н., доц. Воловик А.Ю.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	професор кафедри БЖДПБ, професор д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 22.03.2023 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БДР	14.02.2023-28.02.2023	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2023-23.03.2023	
3.	Затвердження теми. Розробка завдання на БДР.	20.03.2023-31.03.2023	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.04.2023-06.05.2023	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	07.05.2023-18.05.2023	
6.	Розробка графічної частини БДР	19.05.2023-22.05.2023	
7.	Охорона праці (ОП)	23.05.2023-28.05.2023	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	29.05.2023-06.06.2023	
9.	Нормоконтроль	07.06.2023-09.06.2023	
10.	Попередній захист БДР, доопрацювання, рецензування БДР	10.06.2023-20.06.2023	
11.	Захист БДР ЕК	21.06.2023-22.06.2023	

Студент

  
(підпис)

Криштофор Я.В.

Керівник роботи

  
(підпис)

Воловик А.Ю.

## АНОТАЦІЯ

УДК: 621.396.67

Криштофор Я. В. Резонансна хвилевідно-щілинна антена з синфазним збудженням щілин. Бакалаврська дипломна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 81 с. На українській мові. Бібліогр.: 20 . назв; Рис.: 30.

Метою даної бакалаврської дипломної роботи є теоретичне вивчення та експериментальне дослідження хвилеводно-щілинної решітки. В роботі розглянуто призначення, принцип дії антени, а також зроблений літературний огляд сучасних досягнень.

Проведено електричний і конструкторський розрахунки, побудовано діаграми спрямованості антени на трьох довжинах хвиль  $\lambda_{мін}$ ,  $\lambda_{сер}$ ,  $\lambda_{макс}$  в декартовій системі координат. Побудовано залежності коефіцієнта стійкої хвилі від довжини хвилі в діапазоні довжин хвиль. Також у бакалаврській кваліфікаційній роботі проведено розрахунки розділу безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: антена, синфазне збудження, хвилевід

## ABSTRACT

UDK: 621.396.67

Kryshfor Ia.V. Resonant waveguide-slot antenna with in-phase excitation of slots. Bachelor thesis. – Vinnytsia: VNTU, 2023. – 81 p. In Ukrainian language. Bibliography: 20 titles; Fig.: 30.

The objective of this bachelor thesis is a theoretical study and experimental research of waveguide-slot antenna. Setting, principle of action of aerial is considered in this thesis, and also the literary review of modern achievements is done.

Are electric and designer calculations conducted, the diagrams of orientation of aerial are built on three lengths of waves  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\text{mid}}$ ,  $\lambda_{\max}$  in the cartesian system of co-ordinates. Dependences of standing wave ratio wave are built on a wave-length in the range of lengths of waves. Also in the bachelor thesis, calculations were made for the life safety section.

Key words: antenna, in-phase excitation, waveguide.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АНТЕНИ</b> .....	8
1.1 Класифікація антен.....	8
1.2 Хвилеводно-щілинні антени.....	18
<b>2 РОЗРАХУНОК ХВИЛЕВОДНО-ЩІЛИННОЇ АНТЕНИ</b> .....	34
2.1 Вибір розмірів хвилеводу .....	34
2.2 Розташування щілин в хвилеводі.....	37
2.3 Розрахунок діаграми спрямованості.....	39
2.4.Розрахунок збуджуючого пристрою.....	42
2.5 Конструкторський розрахунок антени.....	47
<b>3 ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВОДНО-ЩІЛИННОЇ АНТЕНИ</b> .....	49
3.1 Дослідження діаграми спрямованості.....	49
3.2 Дослідження вхідного опору.....	62
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ</b> .....	64
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	65
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	67
4.3 Пожежна безпека.....	72
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	75
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	76
Додаток А (обов'язковий). Протокол перевірки навчальної (бакалаврської) роботи.....	79
Додаток Б (обов'язковий). Ілюстративний матеріал.....	81



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Широкого розповсюдження набули хвилевідно-щілинні антени, що переважно застосовуються на сантиметрових діапазонах. Вони застосовуються в радіоапаратурі літальних апаратів, завдяки компактності, невеликій вазі і габаритах, а також незначному аеродинамічному опору. Щілини можуть прорізатися в обшивці літального апарату, не погіршуючи при цьому його аеродинамічних показників. Одна щілина або система із двох-трьох щілин забезпечує слабо направлене випромінювання і часто використовуються в якості випромінювача дзеркальних і лінзових антен. Повздовжні щілинні антени на круглому циліндрі застосовуються в діапазоні метрових хвиль для радіомовних станцій з частотною модуляцією. Система, що складається з великої кількості щілин в стінках хвилеводу, здатна формувати вузьку діаграму спрямованості і забезпечувати швидке покачування променя. Такі антени використовуються в радіолокації. Найчастіше використовуються резонансні щілини, що розташовуються по-різному на широкій або вузькій стінках звичайного прямокутного хвилеводу з типом хвилі  $H_{10}$ .

Будь-яка випромінююча щілина навантажує хвилевод і впливає на його режим. Частина потужності, що поширюється по хвилеводу випромінюється щілиною, частина відбивається назад до генератора, а частина проходить далі. Застосовуються одно-направлені, слабо-направлені і багато-направлені щілинні антени. На практиці крім хвилеводно-щілинних антен з нерухомою в просторі ДС застосовуються антени з механічним, електромеханічним і електричним скануванням.

### **Аналіз останніх досліджень.**

Численні наукові праці з проектування антен охоплюють різні типи застосувань, починаючи від систем зв'язку та закінчуючи спеціальними програмами ідентифікації та виявлення. Показано, що антени, котрі використовуються в таких системах, повинні мати високий коефіцієнт

підсилення і високу ефективність, аби забезпечити споживачам належне обслуговування.

**Метою роботи** є створення моделі резонансної хвилевідно-щілинної антени з синфазним збудженням щілин.

**Об'єктом дослідження** є процеси збудження у антені.

**Предмет дослідження** – хвилевідно-щілинні антени.

Для досягнення поставленої мети в бакалаврській дипломній роботі розв'язуються наступні задачі:

- проаналізувати існуючі антени та обґрунтувати переваги хвилевідно-щілинних антен по відношенню до існуючих;
- розробити хвилевідно-щілинну антену;
- дослідити хвилевідно-щілинну антену.

**Методи дослідження** ґрунтуються на використанні: рівнянь математичної фізики під час розробки антен; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл, імітаційному моделюванні.

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

Наукова новизна роботи полягає в отриманні наступних результатів:

Проведено аналіз публікацій, присвячених теоретичним розробленням і експериментальним дослідженням хвилевідно-щілинних антен.

Розглянуто математичні моделі, що описують структуру та функціонування хвилевідно-щілинних антен.

#### **Практичне значення одержаних результатів**

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблено резонансну хвилевідно-щілинну антену з синфазним збудженням щілин.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати бакалаврської дипломної роботи отримані автором практично самостійно в науковій школі д.т.н., проф. Осадчука О.В.

**Структура і обсяг роботи.** Бакалаврська дипломна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.





# 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АНТЕНИ

## 1.1 Класифікація антен

Функціонування радіоелектронного і радіотехнічного обладнання, радіоелектронних та радіотехнічних систем пов'язане з передачею на відстань інформації, яка переноситься електромагнітними хвилями, тобто з випромінюванням та прийманням електромагнітних хвиль. Зважаючи на те, що випромінювання та приймання електромагнітних хвиль здійснюється антенами, можна з певністю стверджувати, що будь-яке радіотехнічне устаткування повинне мати в своєму складі одну чи декілька антен.

Сфера дій антенного пристрою не обмежується випромінюванням та прийманням електромагнітних хвиль. Антени забезпечують при випромінюванні необхідний розподіл поля в просторі або приймання електромагнітних хвиль, що приходять із заздалегідь визначених ділянок простору. Завдяки цьому робочі можливості радіотехнічних систем знаходяться в певній залежності від характеристик антенних пристроїв. Велику роль відіграють антени в сучасному авіаційному радіообладнанні. І це природно, тому що тільки радіо дозволяє встановлювати надійний зв'язок повітряного судна (ПС) з наземними службами, забезпечувати зв'язок між ПС, дає можливість в будь-яку годину доби чи при будь-якій погоді точно визначити місцеположення ПС, виконувати огляд простору за будь-яких умов, автоматично здійснювати посадку та політ за заданими траєкторіями.

У великому аеропорту експлуатується декілька сотень антен, а на важкому транспортному літаку кількість антен становить декілька десятків. Конструкції та особливості розміщення антен залежать від їх призначення. Так, наприклад, наземна антена близького зв'язку (рис. 1.1) повинна забезпечувати зв'язок за всіма напрямками в горизонтальній площині до 200-300 км, тому вона осесиметрична і встановлюється на щоглі,



Рисунок 1.1- Наземна антена близького зв'язку

або ж на даху будівлі. Антена курсового радіомаяка (рис. 1.2) призначена для наведення ПС на вісь злітно-посадочної смуги (ЗПС) з відстані до 50 км, тому вона встановлюється на незначній висоті [13]. Її випромінююча поверхня розміщується перпендикулярно до траєкторії заходу літаків на посадку, а центр антени знаходиться на продовженні осі ЗПС.

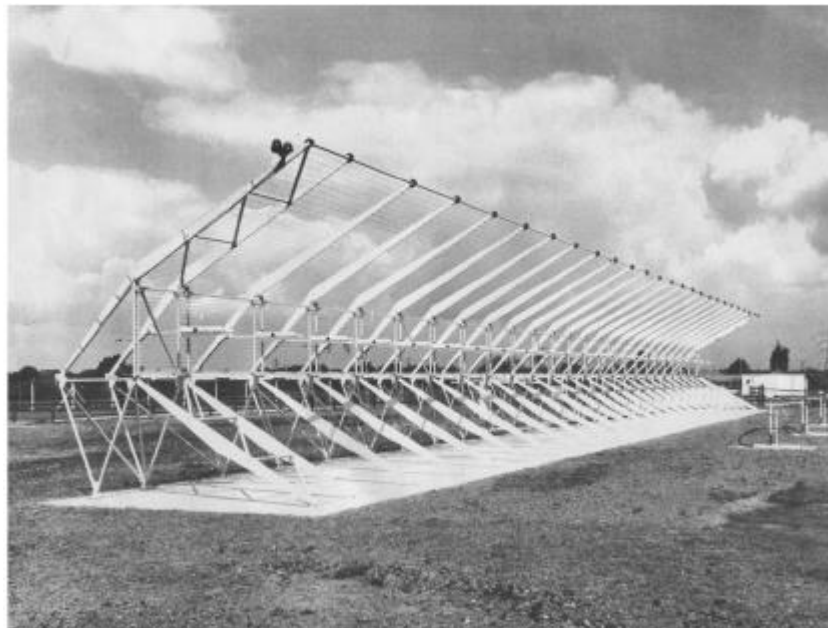


Рисунок 1.2 – Антена курсового радіомаяка

Антену аеродромного радіолокатора (рис. 1.3) призначена для формування вузького проміння і повинна мати можливість змінювати положення проміння в широкому секторі кутів, щоб оглядати повітряний простір в зоні літовиська.

На конструктивні особливості великий вплив справляє необхідність установки антени на борту ПС. Бортові антени повинні задовольняти специфічним вимогам, які виокремлюють такі антени в особливий клас. Електродинамічні характеристики бортових антен суттєво залежать від форми повітряного судна, місця установки антени та довжини хвилі, на якій працює антена. У зв'язку з цим більшість видів бортових антен в конструктивному відношенні значно відрізняються від антен аналогічного призначення, якими обладнуються наземні радіотехнічні засоби.

Антени є перетворювачами електромагнітної енергії. Передавальна антена призначена для перетворення енергії електромагнітних хвиль, пов'язаних із спрямовуючими системами, в енергію електромагнітних хвиль в просторі та їх випромінювання в заданих напрямках. Приймальна антена виконує зворотні функції: вона виділяє електромагнітні хвилі, що надходять з визначених напрямів в просторі, й перетворює їх енергію в енергію електромагнітних хвиль, пов'язаних із спрямовуючими системами.

Таким чином, кожна антена виконує дві функції: перетворює один вид електромагнітної енергії в інший; забезпечує випромінювання електромагнітних хвиль в певних напрямках, або ж забезпечує приймання електромагнітних хвиль, що приходять з певних напрямів.

Обидві ці функції відіграють виключно важливу роль. Дійсно, завдяки перетворенню енергії спрямованих електромагнітних хвиль в енергію електромагнітних хвиль, які вільно поширюються в просторі, і навпаки, стала можливою передача радіохвиль, яка обумовила виникнення та розвиток радіотехніки.

Забезпечення переважних напрямів в просторі випромінювання та приймання електромагнітних хвиль дозволяє зосередити енергію випромінювання в заданих тілесних кутах, що дає можливість зменшити

загальну потужність випромінювання, а також потужність передавача. Цій властивості антен зобов'язана поява та розвиток радіолокації, радіоастрономії, радіорелейного зв'язку.

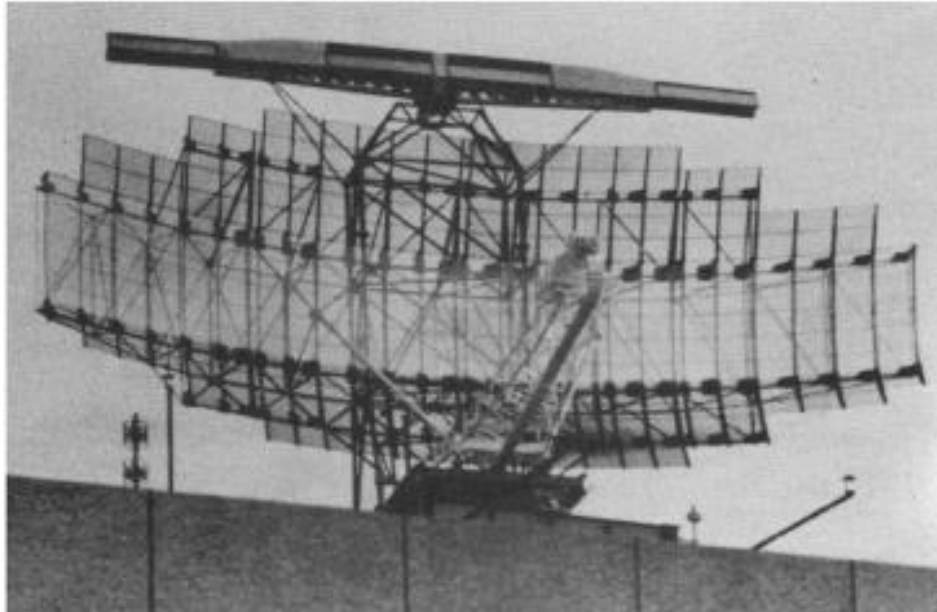


Рисунок 1.3 – Антена аеродромного радіолокатора

У приймальних пристроях друга функція антени використовується також і для збільшення відношення сигнал/завада. В тому випадку, коли джерело завади і передавальна радіостанція рознесені в просторі, але випромінюють електромагнітні хвилі однієї довжини, виділити корисний сигнал за допомогою настройки приймача неможливо. Антена ж, яка приймає електромагнітні хвилі з певних напрямів (рис. 1.4), дозволяє це зробити. Отже, тут ми можемо говорити про вибірковість за напрямком.

Антени є оборотними пристроями. Якщо до входу передавальної антени підвести електромагнітні хвилі, які пов'язані із спрямовуючою системою і енергією яких можна характеризувати напругою  $U$  та силою струму  $I$ , то на виході одержимо електромагнітні хвилі в просторі, енергію яких характеризують напруженість електричного поля  $E$  та напруженість магнітного поля  $H$ . Цей процес перетворення енергії зображений на рис. 1.5, а. Якщо до виходу тієї ж самої антени підвести енергію

електромагнітних хвиль, що вільно поширюються в просторі, то внаслідок оборотності антен на вході одержимо енергію електромагнітних хвиль, які зв'язані із спрямовуючою системою (рис. 1.5, б). Ця властивість антени дозволяє одну і ту ж антену використовувати і як передавальну, і як приймальну.



Рисунок 1.4 – Антенний комплекс

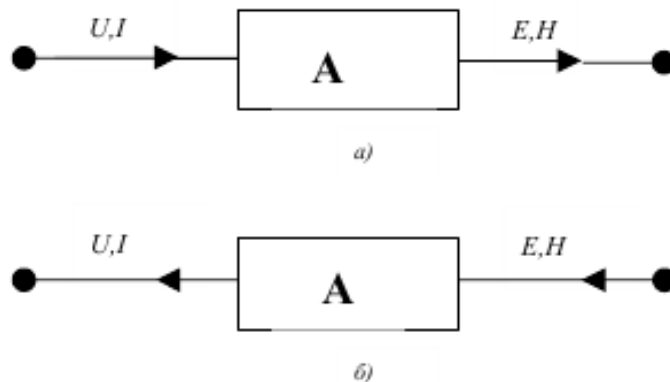


Рисунок 1.5 – Процес перетворення енергії

Фідерні пристрої є спрямовуючими системами і служать для каналізації електромагнітних хвиль від генератора до антени або ж від антени до приймача. Необхідність застосування фідера пояснюється тим, що в більшості випадків обставини змушують розносити на певну

відстань антени та передавачі, антени та приймачі. Наприклад, радіообладнання літаків розміщується так, щоб не порушувати необхідне положення центра маси літака та раціонально використати внутрішній об'єм корпусу. Антени ж такого обладнання виносяться за обшивку літака, щоб зберегти необхідні електродинамічні характеристики. При цьому фідерні пристрої повинні з'єднувати антени з обладнанням, розташованим в літаку.

В наземних радіоелектронних системах антенні пристрої можуть бути досить громіздкими, складатися з великої кількості відносно простих випромінювачів, задовольняти специфічні вимоги до розташування на місцевості і т. ін. (див. рис. 1.2). Природно, що в цих випадках генератори електромагнітних коливань чи приймачі не можуть безпосередньо приєднуватися до антен, необхідні з'єднувальні пристрої - фідери. В будь-якому випадку фідерні пристрої полегшують доступ контрольній апаратурі до перевірки працездатності як антенних пристроїв, так і системи в цілому, покращують умови для технічної експлуатації системи, в багатьох випадках забезпечують безпеку праці обслуговуючого персоналу.

При вивченні антенних та фідерних пристроїв необхідно виходити з певної їх класифікації. Це обумовлено тим, що конструктивна різноманітність антенних пристроїв настільки велика, що вивчення всіх існуючих типів антен в межах виділеного для навчальної дисципліни часу просто неможливо. Крім того в цьому немає і такої потреби, тому що для певної групи антен при правильному їх доборі можна виділити загальні електродинамічні властивості, принципи дії, характерні конструктивні особливості, що дає можливість обмежитися вивчення окремих представників групи.

Визначення таких груп та виявлення належності тієї чи іншої антени до групи, що розглядається, залежить від класифікаційних принципів. Зараз широко використовується класифікація за принципом дії, яка в порівнянні з іншими видами класифікацій дозволяє чіткіше відносити антени до різних



видів та підвидів, однозначно визначати класифікаційні ознаки. Крім того, в такій системі класифікаційні ознаки більш однорідні, чим при інших принципах класифікації. Так наприклад, виконання класифікаційної системи, яка базується на поділі антен за діапазонами хвиль, приводить до змішування ознак, які обумовлені робочим діапазоном хвиль, принципом дії, конструктивними особливостями, функціональним призначенням і т. ін.

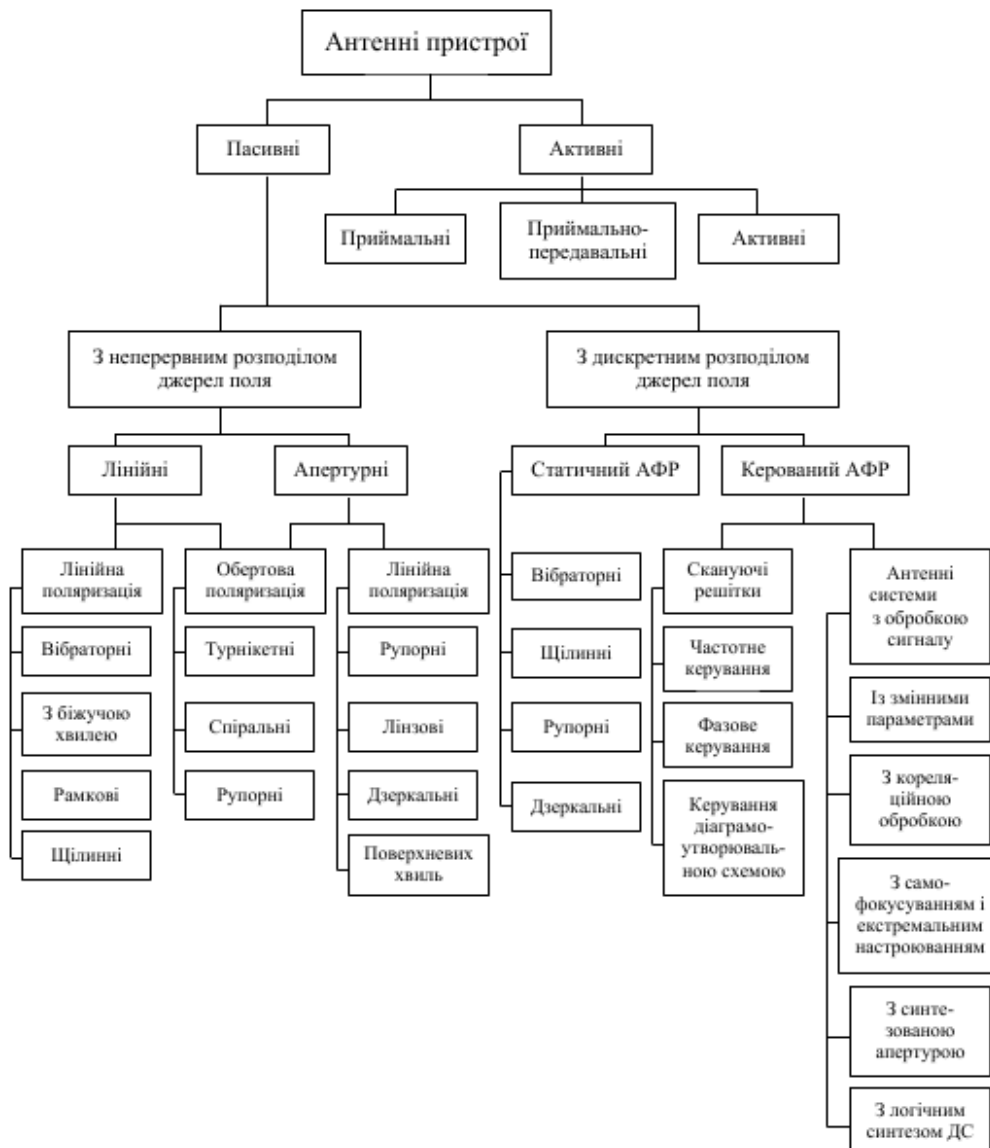


Рисунок 1.6 – Класифікація антен

Рис. 1.6 ілюструє класифікацію, в якій основними ознаками є принцип дії та конструктивні особливості. Передусім, антени можуть бути розподілені на пасивні і активні. Пасивні не містять в собі нелінійних елементів, є оборотними пристроями (можуть працювати як в режимі випромінювання,

так і в режимі приймання), підкоряються принципу взаємності. Активні антени мають в своїй конструкції нелінійні активні елементи (транзистори, інтегральні мікросхеми), в зв'язку з чим вони не мають властивостей оборотності і не підкоряються принципу взаємності. Тому між приймальними та передавальними активними антенами існують принципові відмінності і тому їх поділяють на три класи.

Оскільки головна увага в цьому виданні приділяється пасивним антенам, то в подальшому класифікація будується за ознаками, характерними для пасивних випромінюючих систем. Читачі, які цікавляться активними антенами, можуть ознайомитися з більш повними класифікаційними схемами, що приводяться у відповідних монографіях .

Пасивні антени доцільно вивчати та досліджувати в режимі випромінювання, тому на наступному ступені класифікації всі випромінюючі системи підрозділяють за характером амплітудно-фазового розподілу (АФР) струму чи тангенціальних складових напруженості поля на пристрої з неперервним розподілом джерел поля та пристрої з дискретним розподілом джерел поля. В першому випадку під джерелами поля розуміють елементарні випромінювачі, тобто такі антени, які можна розглядати як сукупність елементарних випромінювачів, що неперервно заповнюють випромінюючу поверхню - апертуру антени, створюючи при цьому неперервну функцію АФР від координат поверхні. В другому випадку джерелами поля є антени першої групи, а самі випромінюючі системи являють собою антенні решітки, АФР в апертурі яких описується ступеневою розривною функцією.

Антени з неперервним розподілом джерел поля діляться на два види: лінійні і апертурні. Лінійні антени характеризуються тим, що розподіл електричного чи магнітного струму мало залежить від конфігурації поперечного перерізу, який значно менший від довжини хвилі. Виконуються лінійні антени у вигляді щілин в металічних поверхнях або ж із провідників, поперечні розміри яких значно менші від довжини хвилі.

В апертурних антенах випромінювання відбувається через деяку уявну поверхню, яка розділяє внутрішній об'єм антени і зовнішній простір. Така поверхня називається апертурою або розкриттям і найчастіше являє собою площину. Як лінійні, так і апертурні антени за характером поляризації випромінюваних хвиль діляться на антени з лінійною поляризацією і антени з еліптичною поляризацією. В останніх площина поляризації обертається в просторі відносно напрямку поширення електричних хвиль.

На наступному ступені класифікації використані конструктивні ознаки.

Антенні решітки (АР) діляться на дві групи за характером часової залежності АФР. До групи АР із статичним АФР відносять випромінюючі системи, в яких в процесі функціонування АФР залишається незмінним. До групи антенних решіток з керованим АФР відносять випромінюючі системи, процес функціонування яких базується на залежності АФР від часу та виконуваних завдань. Дещо умовно цю групу можна поділити на скануючі і на випромінюючі системи з обробкою сигналу.

Скануючі антенні решітки характеризуються тим, що головним завданням їх функціонування є електричне сканування проміння з метою огляду простору. При цьому основні характеристики антени визначаються електродинамічними властивостями, залежністю АФР від часу, просторовими розмірами антен, відстанню між елементами решітки, типом елементів решітки і т. ін.

Випромінюючі системи з обробкою сигналу характеризуються тим, що покращання електричних параметрів антени та виконання поставлених перед антеною завдань досягається не стільки за рахунок електродинамічних властивостей, скільки за рахунок спеціальної обробки сигналів.

Антенні решітки із статичним АФР підрозділяються за конструктивними ознаками. Приведений на рис. 0.6 ряд таких антенних решіток далеко не повний. Так наприклад, зустрічаються антенні решітки, елементами яких є

спіральні антени, діелектричні стрижньові, активні випромінюючі та приймальні пристрої тощо.

Скануючі антени решітки, як правило, поділяються за способом керування АФР на решітки з частотним, фазовим керуванням та багатопроменеві антенні решітки. В багатопроменевих антенних решітках перекриття простору, що оглядається, здійснюється за рахунок формування деякої кількості діаграм спрямованості (ДС), які заповнюють досліджуваний сектор простору. Кожній окремо взятій ДС відповідає свій вхід пристрою живлення антенної решітки (діаграмо утворювальної схеми), тому за допомогою такої антенної решітки огляд простору виконується шляхом перемикання передавача і приймача на вхідних затискачах діаграмо утворювальної схеми.

Антенні системи з обробкою сигналу підрозділяються за способом обробки. Такі АР із змінними параметрами формують одночасно певну кількість ДС (парціальних ДС) з вузькими головними пелюстками, які зсунені в просторі відносно один одного на деякий кут і повністю перекривають визначений сектор простору. За допомогою фільтрів з вузькими смугами пропускання здійснюється відокремлення сигналів, прийнятих різними парціальними ДС.

В антенних решітках із самофокусуванням сигнали, які приймаються елементами решітки, обробляються так, щоб незалежно від напрямку приходу хвилі їх напруженості підсумовувались в фазі - це відповідає такому просторовому положенню ДС антени, при якому головна пелюстка орієнтована в напрямі приходу електромагнітних хвиль. В адаптивних АР, які також відносяться до цієї групи, ДС за рахунок обробки сигналу формується таким чином, щоб одержати оптимальне відношення сигналу до завади. В антенах з синтезованою апертурою уявна апертура утворюється за рахунок пересування в просторі єдиного приймального або приймально-передавального елемента, сигнали з виходу якого записуються і

підлягають спеціальній обробці. Характер обробки сигналів в останніх двох групах цього виду антенних решіток зрозумілий з назв груп.

Класифікація ліній передачі також може базуватися на різних підходах. Приведемо класифікацію (рис. 7), в якій використані конструктивні ознаки ліній передачі.

Конструкція лінії передачі визначає тип електромагнітних хвиль, що поширюються вздовж лінії, та діапазон робочих частот.



Рисунок 1.7 – Класифікація ліній передач

## 1.2 Хвилеводно-щілинні антени

Ідея створення найпростіших щілинних антен належить М.А. Бонч-Бруєвичу та М.С. Нейману [2]. На основі теоретичного аналізу М.С. Нейман у 1940 р. запропонував використовувати в якості випромінювачів маленькі круглі отвори чи невеликі прямолінійні щілини на поверхні об'ємного електричного резонатора. Щоб отримати більш гостру напрямленість випромінювання, можна застосувати ряд щілин на поверхні концентричного фідера чи хвилеводу, як це запропонував М.А. Бонч-Бруєвич. Подальший розвиток теорія

щілинних антен отримала (в 1944-1947 рр.) в працях А.А. Пістолькорса та Я.Н. Фельда.

Важливе досягнення хвилевідно-щілинних антен – можливість коливання (сканування) проміння шляхом зміни фазової швидкості в хвилеводі. Ще в 40-х роках ХХ століття були розроблені щілинні антени, в яких цей ефект досягався зміною відстані між вузькими стінками прямокутного хвилеводу чи зануренням всередину хвилеводу поздовжньої пластини. В 50-60-ті роки були практично реалізовані методи електричного (частотного) сканування, у тому числі для хвилевідно-щілинних фазованих антенних решіток. На сьогодні ж один з перспективних напрямків розвитку техніки щілинних антен – розробка конструкцій на основі друкованих схем та смугових ліній.

Широке розповсюдження отримали щілинні опромінювачі дзеркал у вигляді параболоїда обертання та параболічного циліндра. В останньому випадку (в параболічному циліндрі), застосовується багатоелементна система щілин, розташованих вздовж фокальної вісі циліндра. Поряд з такою лінійною системою щілин можуть застосовуватись багаторядні хвилевідно-щілинні системи, що утворюють невеликі решітки.

Основна область застосування хвилевідно-щілинних антен – радіолокація та радіонавігація. Так, в новітніх морських радарх серії MR-1000ПІ використовується 120 см відкрита хвилевідно-щілинна антена, котра забезпечує зону спостереження від 25 м до 48 морських миль [3]. В MR-1000РІІ використовується 60 см хвилевідно-щілинна антена з обтічником, що забезпечує зону спостереження від 25 м до 36 морських миль. Швидкість обертання антени – 24, 36, 48 обертів за хвилину. До того ж, такі морські радари дозволяють будувати та прогнозувати траєкторії руху до 10 об'єктів. Параметри такої антени представлено в додатку Б.

Ще одне новітнє досягнення із використанням хвилевідно-щілинних антен було запропоновано Московським авіаційним інститутом. А саме розроблено радіолокаційну систему для попередження зіткнень та керування рухом автомобіля в умовах відсутності оптичної видимості [4]. Автомобільна

радіолокаційна система призначена для забезпечення безпечного руху наземних транспортних засобів в умовах обмеження чи відсутності оптичної видимості. Цифрова обробка сигналів радіолокаційною системою дозволяє сформувати та відобразити на ЖКІ моніторі динамічно відновлюване радіолокаційне зображення, ширину дорожнього полотна, відстань до лівого та правого краю дороги, нанести на радіолокаційне зображення віртуальну розмітку смуг руху та оцінки дальності до перешкод, що знаходяться на смузі руху автомобіля. У такій системі використовується хвилевідно-щілинна антена, розрахована на робочу частоту 39 ГГц, з сектором сканування в азимутальній площині рівним  $30^\circ$ , дальністю дії від 10 до 250 м, бортовим живленням від 12 В.

В свою чергу Санкт-Петербурзький державний електротехнічний університет 2001 р. продемонстрував перспективність використання тонких сегнетоелектричних плівок для перестроюваних НВЧ-приладів та можливість успішної реалізації на їх основі фазообертачів НВЧ-діапазону до 30 ГГц включно [5]. Такий фазообертач створено на основі щілинної лінії передачі з сегнетоелектричною плівкою, що працює на частоті 60 ГГц, і він може бути використаний в якості прототипу елемента фазованої антенної решітки для автомобільних радіолокаційних систем безпеки.

Таким чином, одним з перспективних напрямків сучасної антенної техніки є удосконалення способів сканування діаграмою спрямованості антенних решіток, зокрема тих, що забезпечують можливість реалізації ширококутового сканування. Сканування здійснюється з використанням як дискретних чи аналогових фазообертачів (фазове сканування), так і шляхом зміни частоти (частотне сканування).

Реалізації фазового сканування в багатьох багатоелементних решітках вимагає великої кількості порівняно дорогих фазообертачів, що призводить до суттєвого збільшення маси та вартості конструкції, а також ускладнює керування. Крім того, ефективні фазообертачі розроблені та освоєні промисловістю не для всіх частотних діапазонів, завдяки чому пошук



альтернативних способів сканування продовжує привертати увагу розробників антенних решіток.

Спосіб частотного сканування не має таких недоліків, проте в його традиційній реалізації частота використовується як керуючий параметр, що є обмежуючим фактором з точки зору оптимального приймання та завадозахищеності. Саме тому розробка способів сканування, що характеризуються перевагами частотного способу та вільні від характерних для нього обмежень, є практично важливою задачею.

Україна також має досягнення у розробці хвилевідно-щілинних решіток. Так, 21-26 серпня 2007 року київський завод «Радар» представив на авіасалоні МАКС-2007 метеонавігаційну радіолокаційну станцію (МНРЛС) «Буран-А», розроблену в співпраці з українським НДІ «Буран» [6]. Такі станції вже використовуються на літаках українського виробництва Ан-140, Ан-148, Ан-74ТК-300 та російському гідролітаку Бе-200. Вся інформація про небезпечні метеоутворення, зони інтенсивних опадів, турбулентності, гірські вершини відображається на екранах індикаторів. У такій системі малогабаритний передавальний модуль з високочутливим приймачем та хвилевідно-щілинною антеною-решіткою забезпечує високу роздільну здатність.

Окрім того, по всьому світі сьогодні широко розвивається супутниковий зв'язок, що пов'язано зі змінами в останні роки на світовому ринку послуг, оскільки відбувається суттєве зміщення в інтересі клієнтів до рухомого зв'язку. Вирішення цих проблем заключається в створенні економічно ефективної та загальнодоступної глобальної комунікаційної мережі. Концепція низькоорбітальних супутникових систем була вперше запропонована компанією «Motorola Inc.», яка в кінці 80-х років розпочала розробку глобальної супутникової системи рухомого зв'язку «Iridium». Космічний сегмент технічних засобів системи «Iridium» складається з 66 космічних апаратів, кожен з яких обслуговує зону площею близько 19 млн. км<sup>2</sup> [7]. У той же час кожен з таких апаратів має три групи антен: три фазовані антенні решітки, чотири антени зв'язку зі станціями сполучення та чотири хвилеводно-

щілинні антени міжсупутникового зв'язку. Хвилевідно-щілинна антена такого космічного апарату має діапазон від 23,18 до 23,38 ГГц. Використання хвилевідно-щілинних решіток дозволяє зменшити кількість станцій сполучення, звільнитись від багатократних стрибків «земля-космос» та змінювати маршрут зв'язку, обминаючи станцію сполучення чи супутник, що вийшли з ладу.

Хвилевідно-щілинні антени знаходять практичне застосування головним чином в діапазоні надвисоких частот, хоча в принципі можуть використовуватись і на більш низьких частотах.

Серед переваг хвилевідно-щілинних решіток можна виділити наступні: так як відсутні виступаючі частини, випромінююча поверхня хвилевідно-щілинної антени може бути суміщена з зовнішніми обводами корпусу літального апарату, не вносячи при цьому додаткового аеродинамічного опору (бортова антена); в таких антенах можуть бути реалізовані оптимальні діаграми спрямованості, так як розподілення поля в розкритті може вибиратись в широких межах за рахунок зміни зв'язку випромінювачів з хвилеводом; щілинна антена має відносно простий збуджуючий пристрій, а крім того, вона проста в експлуатації.

Недоліком хвилевідно-щілинних антен є обмеженість діапазонних властивостей. При зміні частоти в нескануючій хвилевідно-щілинній антені відбувається відхилення проміння у просторі від заданого положення, що супроводжується зміною ширини діаграми спрямованості та її узгодження з живлячим фідером.

Загалом, хвилевідно-щілинні антени знаходять широке застосування в радіотехніці. Випромінюючими елементами таких решіток є щілини, які порізують в стінках прямокутних хвилеводів. В зв'язку з деякими особливостями таких антенних решіток розглянемо більш детально характеристики випромінюючих елементів. Інтенсивність випромінювання щілини визначається величиною струмів, що перетинаються щілиною, і довжиною її проекції на напрям, перпендикулярний вектору густини струму.

Отже, щілину, потрібно так вирізати в хвилеводі, щоб вона перетинала струми провідності, які протікають по внутрішній поверхні стінок хвилеводу. В зв'язку з цим розташування щілини на стінці хвилеводу знаходиться в прямій залежності від системи поверхневих струмів. На рис. 1.8 приведений розподіл поверхневих струмів в прямокутному хвилеводі при збудженні в ньому хвилі типу  $H_{10}$ . Як видно з рисунку, в широкій стінці хвилеводу будуть інтенсивно випромінювати щілини які вирізані перпендикулярно осі (поперечні) і зміщені відносно осі поздовжні щілини.

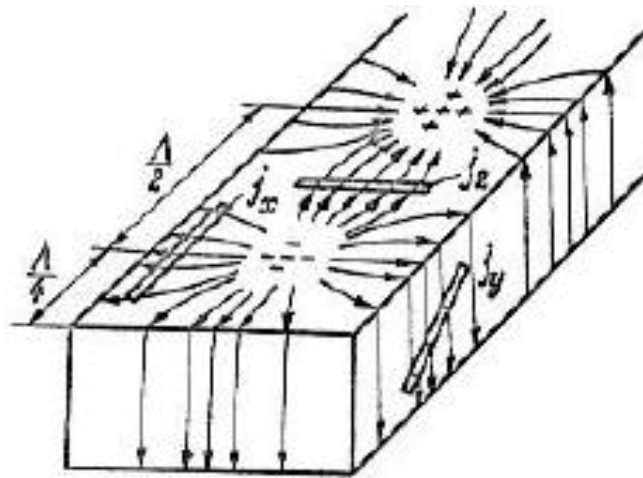


Рисунок 1.8 – Розподіл поверхневих струмів в прямокутному хвилеводі при збудженні в ньому хвилі типу  $H_{10}$ .

Розподіл поля випромінювання щілини, прорізаної в стінці хвилеводу, відрізняється від розподілу поля ідеальної щілинної антени. Відхилення розподілу обумовлені обмеженими розмірами стінки хвилеводу і наявністю решти трьох стінок. Практично можна вважати, що в площині  $H$  розподіл поля випромінювання майже такий як і розподіл поля ідеальної антени. В площині  $E$  розподіл поля, особливо для поздовжніх щілин, істотно відрізняється від розподілу поля ідеального щілинного випромінювача. ДН півхвильової поздовжньої щілини в площині  $E$  наближається до діаграми, що наведена на рис. 1.9.

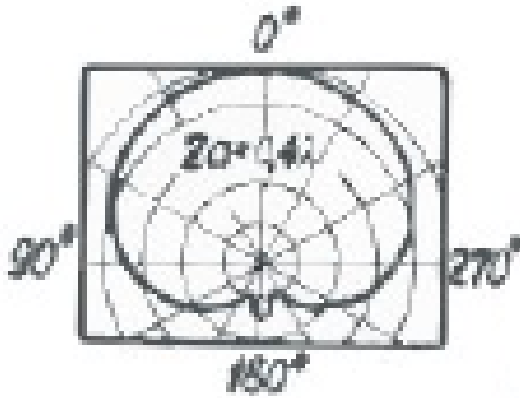


Рисунок 1.9 - ДН півхвильової поздовжньої щілини в площині  $E$

Параметри щілини, прорізаної в стінці хвилеводу, відрізняються від параметрів ідеальної щілинної антени. Насамперед, у розглянутих щілин переважна частина потужності випромінювання розсіюється в одному півпросторі, із-за чого провідність випромінювання щілини мусить бути в два рази меншою, чим провідність випромінювання ідеальної щілинної антени.

Щілина, прорізана в стінці хвилеводу, одночасно працює в режимі приймання і випромінювання, оскільки по відношенню до одного простору (наприклад, до внутрішнього простору хвилеводу для передавальної щілинної антени) щілина є приймальною антеною, а по відношенню до іншого простору (зовнішнього) щілина є передавальною антеною. В зв'язку з цим розрахунок вхідної провідності щілини ускладнюється. Провідність випромінювання щілини, яка є немов би зовнішнім параметром і визначає потужність випромінювання, може розраховуватися по формулі:

$$Y_{щ} = \frac{Z_A}{2(60\pi)^2} \quad (1.1)$$

Вхідна провідність (вхідний опір) щілини визначає режим роботи хвилеводу. Щоб знайти значення вхідної провідності, необхідно дослідити поле

в хвилеводі. Розглядаючи хвилевід, в стінці якого прорізана щілина і який навантажений на хвильовий опір, можемо визначити амплітуди падаючої та відбитої хвиль в поперечному перерізі хвилеводу з щілиною. По коефіцієнту відбиття розраховується вхідний опір щілини.

Спосіб включення отриманого вхідного опору в еквівалентну двопровідну лінію можна визначити по струмам, що збуджують щілину. Так поздовжня щілина в широкій стінці хвилеводу перерізає поперечні струми, що відповідає паралельному включенню опору в еквівалентну лінію (рис. 1.10, а). Поперечна щілина збуджується поздовжніми струмами, тому її вхідний опір в еквівалентній лінії включається послідовно в розрив (рис. 1.10, б). В загальному випадку, для щілини, прорізаної з нахилом до осі хвилеводу, еквівалентна схема має вигляд чотирьох полюсника (рис. 1.10, в), тому щілина збуджується як поздовжніми, так і поперечними струмами.

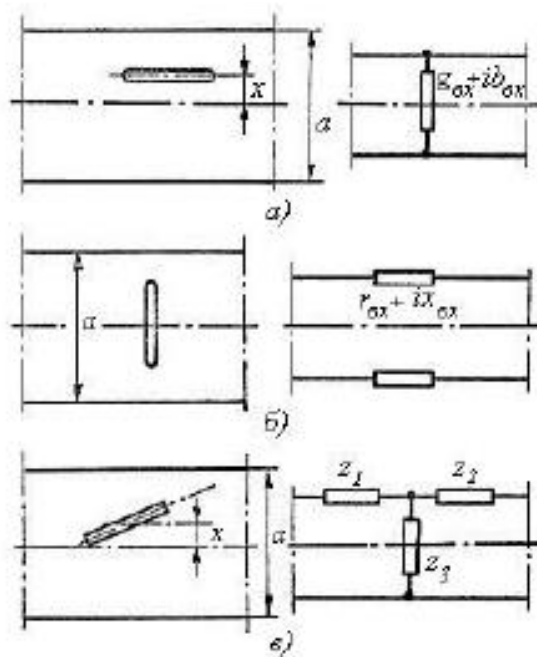


Рисунок 1.10 – Еквівалентні схеми розміщення щілин в хвилеводі

Для резонансних щілин, з довжиною близькою до половини довжини хвилі і прорізаних поздовжньою, нормована вхідна провідність визначається як

$$g_{ex} = 2,09 \cdot \frac{a}{b} \frac{\Lambda}{\lambda} \cos^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{\Lambda}{\lambda}\right) \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (1.2)$$

де -  $a$  і  $b$  – ширина стінок хвилеводу;  $\Lambda$  - довжина хвилі в хвилеводі;  $x$  - зміщення щілини відносно середньої лінії на широкій стінці хвилеводу.

З приведеної формули видно, що щілина, прорізана по осі хвилеводу ( $x=0$ ) має вхідну провідність рівну нулю, тобто така щілина не збудує поле в хвилеводі і не випромінює.

Нормоване значення опору поперечної щілини дорівнює

$$r_{ex} = 0,523 \cdot \left(\frac{\Lambda}{\lambda}\right)^2 \frac{\lambda^2}{ab} \cos^2\left(\frac{\pi}{4} \frac{\Lambda}{\lambda}\right) \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (1.3)$$

Поперечна щілина при  $x=0$  має максимальне значення вхідного опору. Це обумовлене тим, що симетрично прорізана щілина буде перетинати максимальний поздовжній струм.

Нерезонансні щілини матимуть крім активної ще і реактивну складову вхідного опору (провідності).

Оскільки окрема щілина є слабонапрявленою антеною, то для формування ДС з малою шириною головної пелюстки використовують систему щілин, прорізаних в стінці хвилеводу. Таку антенну систему називають хвилевідно-щілинною антеною (ХЩА). Її характеристика спрямованості як і для будь-якої іншої антенної решітки, складається з двох множників: множника, що описує ДС поодинокій щілини  $f_1(\theta)$  і множника системи  $f_c(\theta)$  тобто

$$f(\theta) = f_1(\theta) \cdot f_c(\theta) \quad (1.4)$$

Хвилевід може працювати в режимі стоячої хвилі, для чого його замикають спеціальним поршнем. В цьому випадку щілини прорізуються на

таких відстанях, щоб забезпечити синфазність їх збудження. Подібні ХЩА називають резонансними, тому що при невеликих змінах частоти порушується синфазність живлення щілин.

Резонансну ХЩА можна виконати з поперечними щілинами в широкій стінці хвилеводу (рис. 1.11,а). Для забезпечення синфазності відстань між щілинами мусить дорівнювати довжині хвилі в хвилеводі  $\Lambda$ . Це прямофазне живлення щілин.

На рис. 1.11,б. зображена антена з поздовжніми щілинами. Завдяки поперечному зміщенню щілин збудження буде синфазним при відстані між щілинами рівній  $\Lambda/2$ . На такій відстані фаза струму змінюється на  $180^\circ$ . Але оскільки поздовжні щілини збуджуються поперечними струмами, які з обох боків осьової лінії мають протилежний напрям, то додатковий зсув рівний  $180^\circ$  забезпечується відповідним розташуванням щілин відносно осі широкої стінки хвилеводу. Такий спосіб живлення щілин називають змінно-фазним.

При заданій довжині хвилеводу поздовжніх щілин буде в два рази більше, чим поперечних. Значна відстань між поперечними щілинами рівноамплітудної лінійної решітки обумовлює появу головних пелюсток високих порядків, що є недоліком антени.



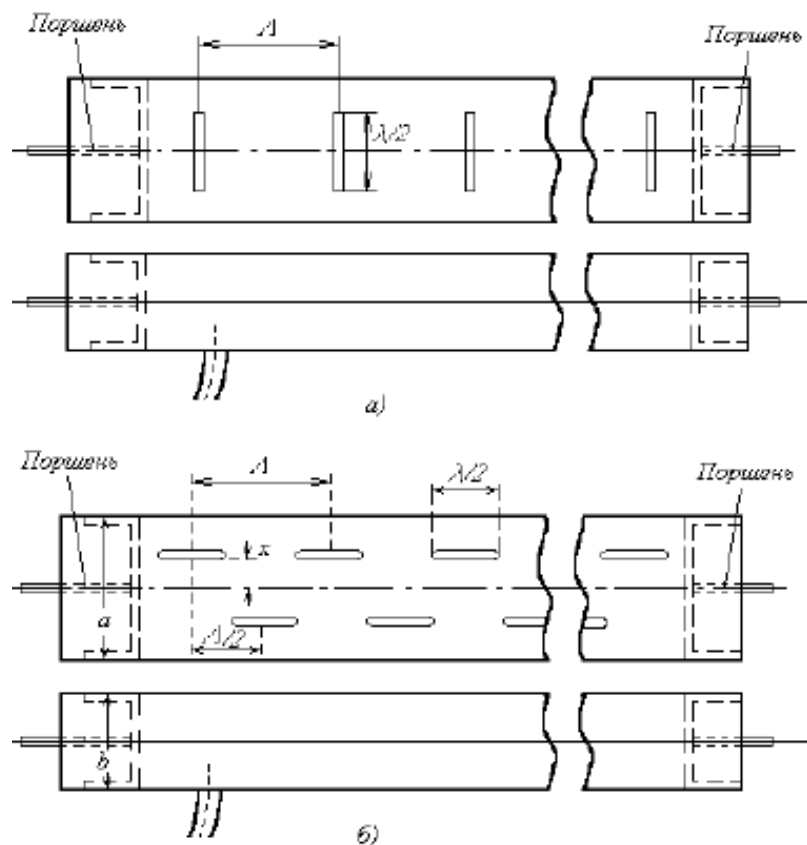


Рисунок 1.11 – Види щілин в резонансній ХЩА

Поздовжні щілини можна розмістити на середній лінії широкої стінки. Збудження таких щілин досягається за допомогою вставлених в хвилеводі штирів. На рис. 1.12,а зображена подібна антена з штирями, розміщеними поперемінно. Без реактивного штиря поперечні струми розподілені симетрично відносно поздовжньої осі хвилеводу (рис.12,б). Штир представляє собою вібратор, орієнтований паралельно вектору  $E$ , тому в ньому наводиться струм. Струм штиря викривляє розподіл поверхневих струмів в хвилеводі і буде протікати поперек осі широкої стінки хвилеводу (рис. 11.в). Очевидно, що цей струм збуджуватиме поздовжню щілину. Розміщуючи штирі на відстанях, рівних  $\Lambda/2$ , отримуємо зміну фази струму штирів на  $180^\circ$ . Тому при поперемінному відносно середньої лінії розташуванні штирів і відстані між щілинами рівної  $\Lambda/2$  отримаємо синфазне збудження елементів антенної решітки.

На вузьких стінках хвилеводу протікають поперечні струми і тому для інтенсивного збудження щілина мусить розміщуватись поздовжньо (рис. 1.8). Але при цьому необхідно брати відстань між щілинами для забезпечення синфазного збудження рівною  $\Lambda$  (прямофазне збудження), що може привести до появи головних пелюсток ДС вищих порядків.

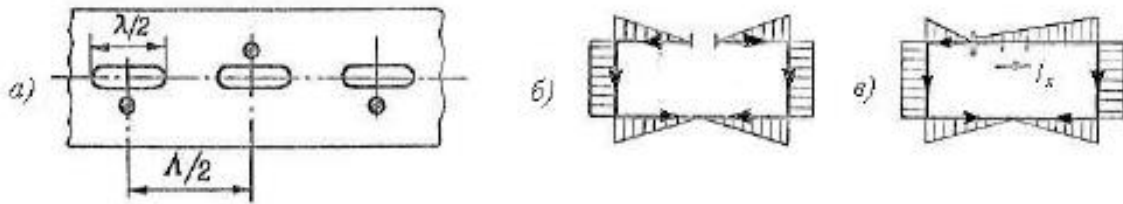
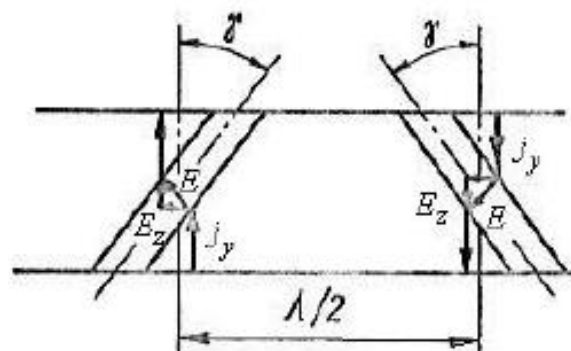


Рисунок 1.12 – Розподіл струмів поздовжніх щілин

Щоб зменшити відстань між щілинами до  $\Lambda/2$ , їх прорізають з поперемінним нахилом до середньої лінії вузької стінки хвилеводу (рис. 1.13). Нахилені щілини в вузькій стінці перерізають поперечні струми, тому між крайками щілини з'являються струми зміщення. Розкладаючи вектор  $E$  в площині щілини на горизонтальну і вертикальну складові можемо пересвідчитися, що горизонтальні складові  $E$  будуть направлені в одну сторону. Таким чином, відносно горизонтальної складової поля щілини збуджені синфазно, вертикальної – протифазно. Останнє буде викликати збільшення інтенсивності бічних пелюсток. Кут нахилу визначає ступінь збудження щілини. Щоб забезпечити резонансну довжину щілини в бічній стінці хвилеводу, її подовжують дещо на широкіх стінках.



## Рисунок 1.13 – Нахилені щілини

Поперечні щілини у вузьких стінках хвилеводу можна збуджувати за допомогою реактивних Г-подібних штирів. В цьому випадку вигнута частина штиря спрямовується паралельно вектору  $E$  в хвилеводі. Фаза поздовжнього струму, який з'являється на вузькій стінці хвилеводу, змінюється на  $180^\circ$  при зміні напрямку зігнутої частини штиря (вгору або вниз). Такий спосіб збудження щілин дає можливість отримати синфазну резонансну антену з поперечними щілинами, прорізними в вузькій стінці хвилеводу на відстанях  $d=\lambda/2$ .

В нерезонансних ХЩА щілини збуджуються біжучою хвилею. За винятком особливих випадків відстань між щілинами вибирають відмінною від  $\lambda/2$  або  $\lambda$ , що забезпечує високий коефіцієнт біжучої хвилі в хвилеводі. При відстанях, кратних  $\lambda/2$ , відбиті хвилі будуть, поширюючись до входу антени, складатися в фазі, що збільшить результуючу відбиту хвилю в стільки разів, скільки щілин прорізано в хвилеводі. Якщо ж відстань між щілинами не кратна  $\lambda/2$ , то відбиті хвилі будуть зсунуті по фазі і результуюча (сумарна) хвиля буде меншою, ніж в першому випадку.

Система розміщення щілин в нерезонансних антенах така ж, що і в резонансних. Режим біжучої хвилі створюється за допомогою узгодженого поглинаючого навантаження, яке встановлюють в кінці хвилеводної секції. Щілини в антенах такого типу збуджуються з деяким зсувом по фазі, що приводить до відхилення напрямку максимального випромінювання від перпендикуляра до розкриву антени. Позбавити збудження щілин фазового зсуву можна при розміщенні щілин на відстанях, кратних  $\lambda/2$ . Щоб при цьому не погіршувався режим роботи хвилеводу, необхідно узгоджувати вхідний опір кожної щілини з хвильовим опором хвилеводу. Узгодження досягають відповідним розміщенням щілин на стінці хвилевода, чим визначається значення вхідного імпедансу та використанням підстроєчних елементів для компенсації реактивної складової вхідного опору щілини. На

рис. 1.14 зображена антена з узгодженими нахиленими і зміщеними щілинами. Значення нормованої активної складової вхідної провідності підбирається рівним одиниці шляхом відповідного зміщення щілин та їх нахилу. Реактивна складова компенсується за допомогою реактивного штиря

У ХЩА, що збуджуються біжучою хвилею, смуга пропускання більш широка, чим в резонансних антенах. Так, наприклад, для антени з узгодженими щілинами смуга пропускання становить 5...10 %.

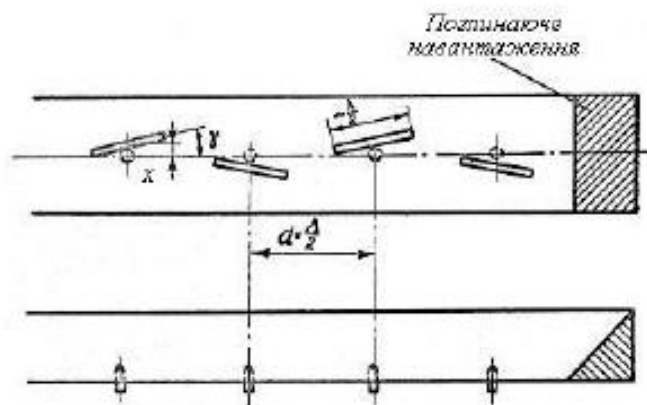


Рисунок 14 – Антена з узгодженими нахиленими і зміщеними щілинами

Характеристику спрямованості ХЩА визначається формулою

$$f(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) \cdot f_c(\theta, \varphi) \quad (1.5)$$

Враховуючи, що множник  $F_1(\theta)$  або  $f_1(\theta)$  при зміні кута  $\theta$  мало змінюється і ХС, в основному, визначається множником системи  $f_c(\theta)$ , для площини  $E$  приймаємо

$$f_1(\theta) = 1$$

і для площини  $H$

$$f_c(\theta) = \frac{\cos(kl \cdot \sin \theta) - \cos kl}{\cos \theta} \quad (1.6)$$

де кут  $\theta$  відраховується від перпендикуляра до площини щілини. Вважаючи, що всі щілини антени збуджуються з однаковою інтенсивністю, для еквідистантної системи запишемо:

$$f_c(\theta) = \frac{\sin \left[ \frac{n}{2} (kd \cdot \sin \theta - \psi) \right]}{\sin \left[ \frac{1}{2} (kd \cdot \sin \theta - \psi) \right]} \quad (1.7)$$

де  $n$  - число щілин,  $d$  - відстань між щілинами,  $\psi$  - фазовий зсув коливань, що збуджують суміжні щілини.

Для резонансної щілини довжиною  $l/2$  ХС приймає значення

$$F_1(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\cos \theta} \quad (1.8)$$

Множник системи для резонансної ХЩА також спрощується:

$$F_c(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{nk d}{2} \sin \theta\right)}{n \sin\left(\frac{k d}{2} \sin \theta\right)} \quad (1.9)$$

Відхилення напрямку максимального випромінювання від нормалі до розкриття нерезонансної ХЩА знаходимо з виразу для  $f_c(\theta)$

$$k d \sin \theta_m - \psi = 0 \quad (1.10)$$

Звідси

$$\theta_m = \arcsin \frac{\psi}{kd} \quad (1.11)$$

Фазовий зсув  $\psi$  розраховують по довжині хвилі в хвилеводі  $\Lambda$  і відстані між щілинами. Для системи з ідентичним розміщенням щілин (прямофазним збудженням), яке не приводить до появи додаткових фазових зсувів

$$\psi = \frac{2\pi}{\Lambda} d - 2\pi \quad (1.12)$$

а кут  $\theta_m$

$$\theta_m = \arcsin \left( \frac{\lambda}{\Lambda} - \frac{\lambda}{d} \right) \quad (1.13)$$

Якщо щілини розміщуються поперемінно по обидва боки середньої лінії, то коливання, що збуджують щілини, набувають додатковий фазовий зсув (змінно-фазне збудження). Тому

$$\psi = \frac{2\pi}{\Lambda} d - \pi \quad (1.14)$$

Відхилення максимального випромінювання від нормалі становить кут

$$\theta_m = \arcsin \left( \frac{\lambda}{\Lambda} - \frac{\lambda}{2d} \right) \quad (1.15)$$

Як впливає з формул (1.13) і (1.15) напрям максимального випромінювання залежить також від частоти коливань і від довжини хвилі в хвилеводі.

Коефіцієнт спрямованої дії ХЩА наближено можна оцінити формулою

$$D \approx 3,2n.$$

ККД синфазних антен дуже високий, у нерезонансних при значній кількості щілин досягає 0,90...0,95.

Таким чином, на сьогодні розробка таких антен, як хвилевідно-щілинні, є актуальною задачею, що пов'язано із стрімким розвитком радіолокації, радіонавігації та радіозв'язку, де вони широко застосовуються.

## **2 РОЗРАХУНОК ХВИЛЕВОДНО-ЩІЛИННОЇ АНТЕНИ**

### **2.1 Вибір розмірів хвилеводу**

Маючи заданий в технічному завданні діапазон частот, можна розрахувати довжину хвилі за формулою:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.1)$$





									ц) Дб/м
R48	3,94- 5,99	47,55	22,149	0,8	1,625	50,8	25,4	1,05	0,0355

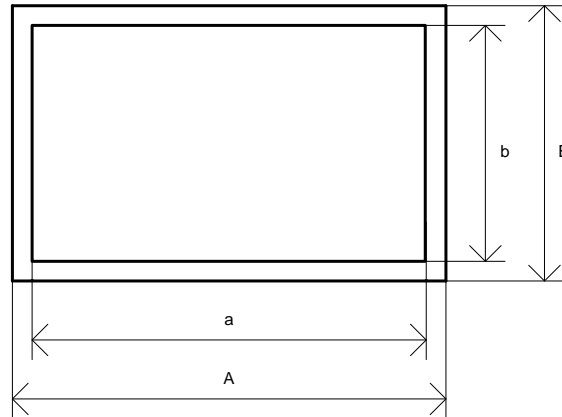


Рисунок 2.1 - Розміри хвилеводу

Знаючи геометричні розміри хвилеводу (внутрішні) визначимо довжину хвилі в хвилеводі

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{4a^2}\right)}}; \quad (2.2)$$

$$\lambda_{\text{хв}} = \frac{70}{\sqrt{\left(1 - \frac{70^2}{4 \cdot 47,55^2}\right)}} \approx 100(\text{мм}).$$

Знайдемо кількість щілин, що необхідно прорізати в хвилеводі [4]

$$N = \frac{D}{3 \div 4}; \quad (2.3)$$

де  $D$  - коефіцієнт спрямованої дії.

Визначимо КСД відносно заданого в ТЗ коефіцієнта підсилення. При ККД=1 КСД дорівнює коефіцієнту підсилення. ККД такого типу антени дорівнює 80-95%. Задаємо ККД=90%. Отже КСД буде становити 90.Тоді

$$N = \frac{90}{4} = 22,5 \approx 23.$$

Оскільки антену вважаємо резонансною, то будемо використовувати енергетичний метод розрахунку, який полягає в наступному: якщо розподілення по антені позначити  $f(z_n)$  і врахувати, що всі щілини резонансні, то еквівалентна нормована провідність  $n$ -ої щілини буде рівна

$$g_n = g_{ex} \frac{f^2(z_n)}{\sum_{n=1}^N f^2(z_n)}. \quad (2.4)$$

У випадку рівномірного амплітудного розподілення

$$\frac{f^2(z_n)}{\sum_{n=1}^N f^2(z_n)} = N. \quad (2.5)$$

Вхідну провідність антени вибираємо рівною 1, щоб узгодити антену з кабелем, що її живить. Тоді

$$g_n = \frac{g_{ex}}{N} \quad \text{або} \quad g_n N = 1. \quad (2.6)$$

Тобто нормована провідність однієї щілини

$$g_{щ} = g_n = \frac{1}{23} = 0,044(См)$$

## 2.2 Розташування щілин в хвилеводі

Вибираємо повздовжнє розміщення щілин в широкій стінці хвилеводу у шаховому порядку [3] на відстані  $\frac{\lambda_{xв}}{2}$ , що дорівнює 50 мм. Це дозволяє виграти у конструктивному виконанні антени, оскільки кількість і розміри щілин порівняно великі.

Розрахуємо зміщення центру щілин відносно середньої лінії [3] за формулою:

$$g_{щ} = 2,09 \frac{a}{b} \frac{\lambda_{xв}}{\lambda} \cos^2 \left( \frac{\pi}{2} \frac{\lambda}{\lambda_{xв}} \right) \sin^2 \left( \pi \frac{x_0}{a} \right) \quad (2.7)$$

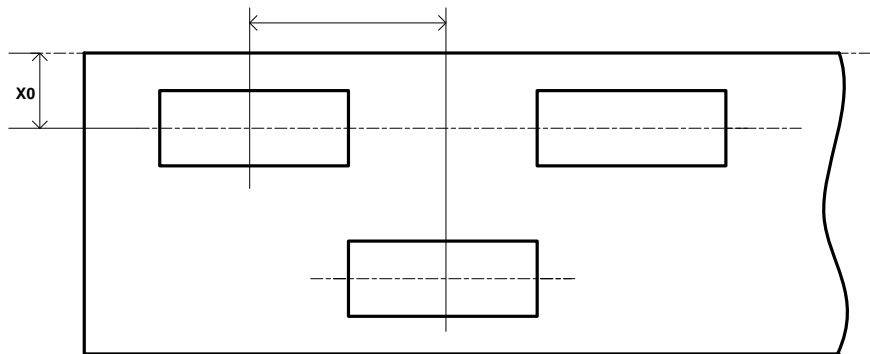


Рисунок 2.2 - Повздовжнє розміщення щілин в хвилеводі

З формули (2.7) маємо, що  $x_0 = 15 \text{ мм}$ .

Знаходимо амплітуду напруги в пучності

$$U_n = \sqrt{\frac{2 \cdot P_E}{NG_E}}, \quad (2.8)$$

$$U_n = \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{23 \cdot 0.001}} = 9,5 \text{ В}$$

Визначаємо ширину щілини

$$d_{щ} \geq \frac{(2 \div 3)U_n}{E_{кр}}, \quad (2.9)$$

$$d_{щ} \geq \frac{3 \cdot 9.5}{30 \cdot 10^3} \approx 1 \text{ мм}.$$

де  $E_{кр}$  - критичне значення напруженості поля, при якій настає електричний пробій (для повітря при н.у. -  $E_{кр} = 30 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$ ).

З умови нерівності можна прийняти  $d = 2 \text{ мм}$ .

Знайдемо вкорочення щілини

$$\Delta l = \frac{45,2\lambda}{240\pi \left( \ln \frac{4\lambda}{\pi d_{щ}} - 0,578 \right)}, \quad (2.10)$$

$$\Delta l = \frac{42,5 \cdot 70}{240\pi \left( \ln \frac{4 \cdot 70}{\pi \cdot 2} - 0,578 \right)} = 0,00024 \text{ мм}$$

Значення  $\Delta l$  досить мале, тому резонансна довжина щілини  $l_{щ} = \frac{\lambda}{2} = 35 \text{ мм}$ .

### 2.3 Розрахунок діаграми спрямованості

Розглянемо положення кутів  $\theta$  і  $\varphi$  в Декартові системі координат відносно випромінюваної щілини.

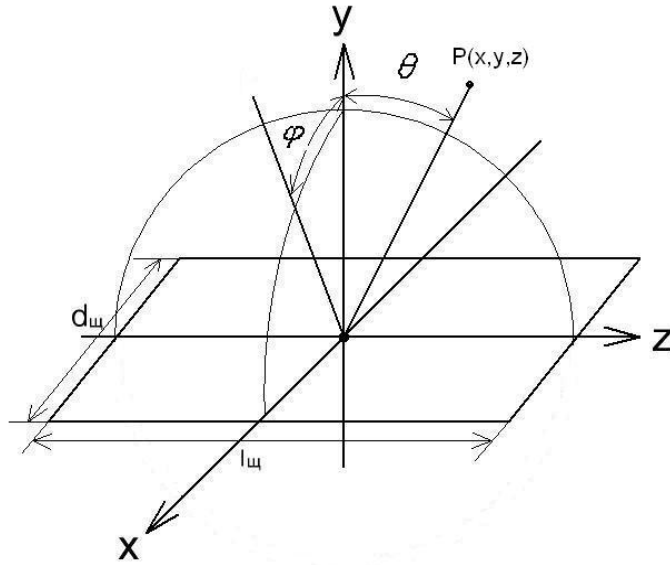


Рисунок 2.3 – Відлік кутів при розрахунку ДН хвилевідно-щілинних антен

Форма діаграми спрямованості визначається амплітудно-фазовим розподіленням [4]. У нашому випадку: амплітудне розподілення - рівномірне, фазове розподілення - лінійне.

Нормована діаграма спрямованості лінійної решітки ідентичних випромінювачів може бути записана у вигляді

$$F(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi)F_n(\theta, \varphi) \quad (2.11)$$

де  $F_1(\theta, \varphi)$  - діаграма спрямованості одного випромінювача;

$F_n(\theta, \varphi)$  - множник антени.

У випадку рівномірного амплітудного і лінійного фазового розподілення

$$F_n(\theta) = \frac{\sin \frac{N}{2} \psi}{N \sin \frac{\psi}{2}}, \quad (2.12)$$

де  $\psi = kd \sin \theta - \psi_1$  - зсув по фазі між полями, створеними в точці спостереження між сусідніми випромінювачами;

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} - \text{фазова постійна};$$

$\theta$  - кут між нормаллю і лінією розташування щілин;

$\psi_1$  - різниця фаз сусідніх щілин по системі живлення;

$N$  - кількість щілин.

Для синфазної антени  $\psi_1=0$ ; для поперечної щілини

$$F_1(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta}, \quad (2.13)$$

Ширина головної пелюстки

$$2\theta_{0,5} = \frac{51\lambda}{Nd}, \quad (2.14)$$

де  $d$  - це відстань між щілинами, яка дорівнює 50 мм,  
тоді

$$2\theta_{0,5} = \frac{51 \cdot 70}{50 \cdot 23} = 3,1^\circ.$$

Розрахуємо ДС для середньої довжини хвиль для даної антени [4]

$$\lambda_{cp} = 70 \text{ мм}$$

$$k = \frac{2\pi}{70} = 0,089, \quad \psi = 0,089 \cdot 50 \cdot \sin \theta, \text{ тоді}$$

$$F_n(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\theta\right)}{\cos\theta} \cdot \frac{\sin\left(\frac{23}{2} \cdot 0,089 \cdot 50 \cdot \sin\theta\right)}{23 \cdot \sin\left(\frac{0,089 \cdot 50 \cdot \sin\theta}{2}\right)} \quad (2.15)$$

Побудуємо діаграму спрямованості в декартовій системі координат (Рис.2.4).

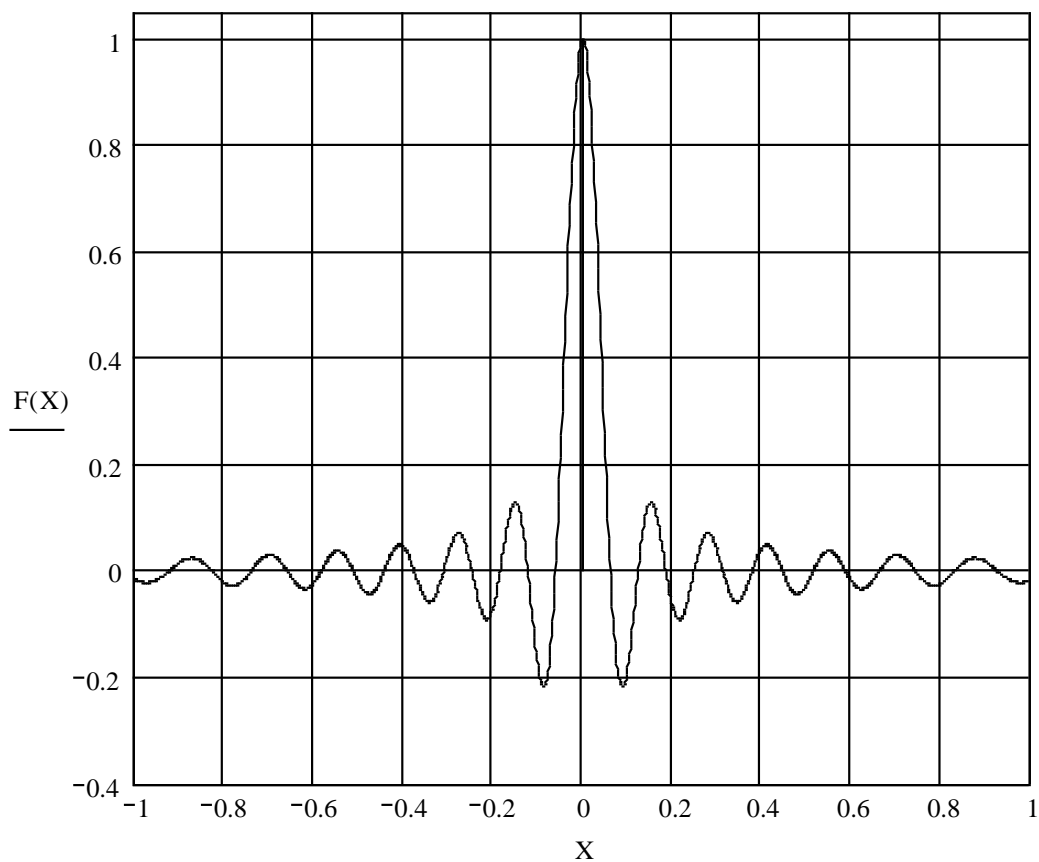


Рисунок 2.4 - Діаграма спрямованості для середньої довжини хвилі

$$\lambda_{cp} = 70 \text{ мм}$$

#### 2.4 Розрахунок збуджуючого пристрою

Найпоширенішими є збуджуючі пристрої, які виконуються у вигляді несиметричного штиря [3], що розташований паралельно електричним силовим лініям. Спеціально підбираючи довжину штиря  $l$  і відстань від штиря

до закорочуючої стінки  $l_1$ , можна забезпечити необхідне узгодження антени із коаксіальним хвилеводом, тобто отримати чисто біжну хвилю в коаксіальній лінії при чисто біжній хвилі типу  $H_{10}$ . Діелектрична шайба, що фіксує положення щтиря в хвилеводі є деталлю коаксіального з'єднання. Довжина шайби береться рівною  $\frac{\lambda_{xв}}{4}$ .

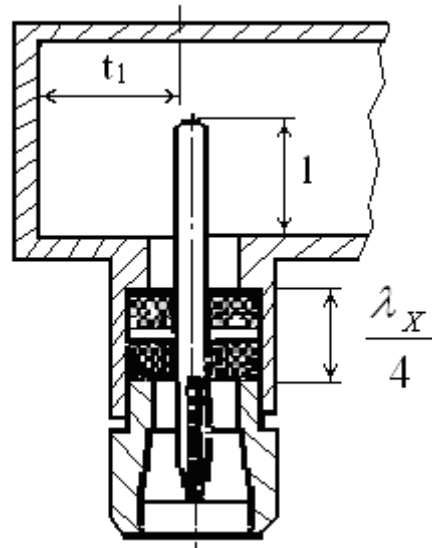


Рисунок 2.5 - Зондовий перехід

Активна частина опору щтиря в хвилеводі вважається рівною опору випромінювання. Вона повинна бути рівна хвильовому опору фідера

$$R_{вх} = R_{\phi} = 75 \text{ Ом}$$

Із довідника вибираємо необхідний тип коаксіального кабелю [6].

Таблиця 2.2 – Параметри вибраного хвилеводу

Марка кабеля	Діаметри, мм			Хвильовий опір,	Макс. ємність пФ/м	Напруження початку	Максимальне затухання, дБ/м на
	Внутр.	По внут	По обо-				
	р.		обо-	вий			



	прові - дник	р. ізоля - ції	лочки	Ом		корони , кВ	частотах	
							200 МГц	3000 МГц
РК-75-9-13 (РК-103)	1,35	9,0	12,2	75	75	4,5	0,12	0,8

Опір випромінювання штиря в прямокутному хвилеводі в режимі біжучої хвилі визначається

$$R_{\text{ex}} = \frac{2\rho_{\text{ex}}h_D^2}{a \cdot b} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{a} \cdot x_1\right) \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot l_1\right), \quad (2.16)$$

де  $x_1$  - положення штиря в хвилеводі відносно широкої стінки

$$x_1 = \frac{a}{2}, \quad (2.17)$$

$$x_1 = \frac{47,55}{2} = 23,77.$$

$\rho_{x\phi}$  - характеристичний опір хвилеводу

$$\rho_{x\phi} = 120\pi \frac{\lambda_{x\phi}}{\lambda}, \quad (2.18)$$

$\lambda_{x\phi}$  - довжина хвилі в прямокутному хвилеводі,  $\lambda_{x\phi} = 100\text{мм}$

Тоді за виразом (2.18)

$$\rho_{xв} = 120\pi \frac{100}{70} \approx 538(\text{Ом})$$

Далі визначимо діючу висоту штиря, прийнявши опір його випромінювання рівним хвильовому опору коаксіалу, тобто 75 Ом.

А  $l_1$  - довжина відрізка хвилеводу від збуджувача до закороченої стінки (закорочуючий поршень) вибирається

$$l_1 = \frac{\lambda_{xв}}{4}, \quad (2.19)$$

$$l_1 = \frac{100}{4} = 25(\text{мм}).$$

$$h_d = \frac{\sqrt{\frac{R_{\Sigma} ab}{2\rho_{xв}}}}{\sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot x_1\right) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{xв}} \cdot l_1\right)}, \quad (2.20)$$

$$h_d = \frac{\sqrt{\frac{75 \cdot 47,55 \cdot 22,149}{2 \cdot 538,28}}}{\sin\left(\frac{\pi}{47,55} \cdot 23,77\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{100} \cdot 25\right)} = 8,7(\text{мм})$$

Визначимо справжню висоту штиря  $l$

$$l = \arccos\left(1 - \frac{2\pi h_d}{\lambda}\right) \cdot \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (2.21)$$

$$l = \arccos\left(1 - \frac{2\pi \cdot 8,7}{70}\right) \cdot \frac{70}{2\pi} = 11,2(\text{мм})$$

Визначимо відстань  $l_2$  - відстань від щитра до першої щілини. Ця відстань розраховується з умов поширення нижчих типів хвиль.

$$l_2 = \frac{4,6 \cdot \lambda}{2\pi \cdot \sqrt{\left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 - 1}}, \quad (2.22)$$

$$l_2 = \frac{4,6 \cdot 70}{2\pi \cdot \sqrt{\left(\frac{70}{47,55}\right)^2 - 1}} = 45(\text{мм}).$$

Розрахуємо вхідний опір  $R_{\text{вх}}$  на частоті  $\lambda_{\text{max}} = 73\text{мм}$

$$R_{\text{вх}} = \frac{2\rho_{\text{хв}} h_{\text{Д}}^2}{a \cdot b} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{a} \cdot x_1\right) \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{max}}} \cdot l_1\right) \quad (2.23)$$

Підставивши чисельні значення отримаємо

$$R_{\text{вх}} = \frac{2 \cdot 538 \cdot 8,7^2}{47,55 \cdot 22,149} \cdot \sin^2\left(\frac{3,14}{47,55} \cdot 23,77\right) \cdot \sin^2\left(\frac{6,28}{73} \cdot 25\right) = 69,6(\text{Ом})$$

Розрахуємо вхідний опір  $R_{\text{вх}}$  на частоті  $\lambda_{\text{min}} = 66\text{мм}$

$$R_{\text{вх}} = \frac{2\rho_{\text{хв}} h_{\text{Д}}^2}{a \cdot b} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{a} \cdot x_1\right) \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_{\text{min}}} \cdot l_1\right) \quad (2.24)$$

Підставивши чисельні значення отримаємо

$$R_{\text{вх}} = \frac{2 \cdot 538 \cdot 8,7^2}{22,86 \cdot 10,16} \cdot \sin^2\left(\frac{3,14}{47,55} \cdot 23,77\right) \cdot \sin^2\left(\frac{6,28}{66} \cdot 25\right) = 63,5(\text{Ом})$$

Визначимо коефіцієнт стійної хвилі  $K_{CTU}$  при умові ( $z_{x\delta} > z_H$ )

$$K_{CTU} = \frac{z_{x\delta}}{z_H} \quad (2.25)$$

де  $z_{x\delta} = 75(Ом)$  - хвильовий опір стандартного коаксіального кабелю;

$z_H$  – опір навантаження.

Підставивши числові значення отримаємо

при  $z_H = R_{ex} = 69,6Ом$

$$K_{CTU} = \frac{75}{69,6} = 1,07$$

при  $z_H = R_{ex} = 63,5Ом$

$$K_{CTU} = \frac{75}{63,5} = 1,18$$

Розрахований коефіцієнт стійної хвилі не перевищує заданий в ТЗ (по даним ТЗ  $K_{CTU} \leq 1,2$ ).

З рисунка 2.6 видно, що при збільшенні довжини хвилі зменшується коефіцієнт стійної хвилі.

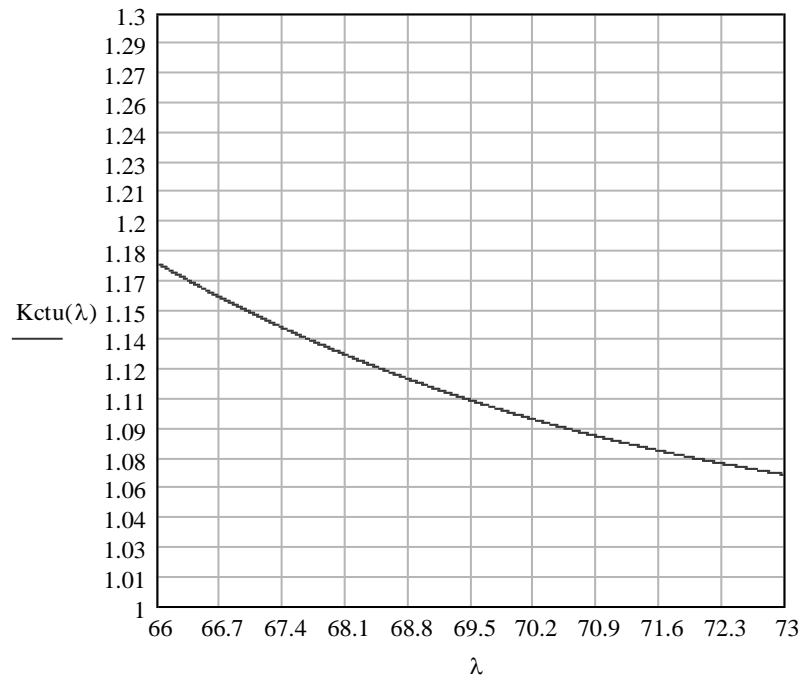


Рисунок 2.6 - Залежність коефіцієнта стійної хвилі від довжини хвилі.

## 2.5 Конструкторський розрахунок антени

Розроблена хвилеводно-щілинна антена представляє собою хвилевід з прорізними у ньому в шахматному порядку щілинами. Розміри хвилевода вказані в Табл.2.2. Відстань між щілинами в такій антені буде рівна  $\frac{1}{2}\lambda_{\text{хв}}$ , збудження синфазне. А сама антена буде побудована на основі закороченого з двох кінців хвилеводу.

Довжину антени знайдемо за формулою

$$L = l_1 + l_2 + (N - 1) \cdot d + \frac{d}{2} \quad (2.26)$$

де  $d = \frac{\lambda_{\text{хв}}}{2} = 50\text{мм}$  - відстань між щілинами;

$\frac{d}{2} = 25\text{мм}$  - відстань від короткозамикаючого поршня до найближчої щілини;

Тоді довжина антени

$$L = 25 + 45 + 1100 + 25 = 1195(\text{мм}) = 119,5(\text{см})$$

Розміщення щілин в хвилеводі повздовжнє, ширина щілини  $d_{щ} = 2\text{мм}$ , довжина щілини  $l_{щ} = 35\text{мм}$ , зміщення щілин відносно краю широкої стінки хвилевода  $x_0 = 15\text{мм}$ . Положення штиря в хвилеводі відносно широкої стінки  $x_1 = 23,77\text{мм}$ , висота штиря  $l = 11,2\text{мм}$ , довжина відрізка хвилеводу від збуджувача до закороченої стінки (закорочуючого поршня)  $l_1 = 25(\text{мм})$ , відстань від штиря до першої щілини  $l_2 = 45(\text{мм})$ .

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВОДНО-ЩІЛИННОЇ АНТЕНИ

Параметри антен можна розділити на три групи. До першої групи віднесемо параметри, що характеризують антену за полем випромінювання, тобто параметри, які визначаються за розподілом електромагнітних хвиль в просторі. Ці параметри створюють групу характеристик випромінювання, в яку входять: характеристика спрямованості (ХС) та ДС, поляризаційна характеристика антени, коефіцієнт спрямованої дії (КСД) і т. ін. До другої групи віднесемо параметри, що характеризують антену за інтенсивністю електромагнітних хвиль, які живлять антену. Найбільш важливими з цих параметрів є вхідний опір, опір втрат, хвильовий опір антени. Третя група параметрів характеризує антену як перетворювач одного виду електромагнітних хвиль в інший. До цих параметрів належать коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт підсилення антени, опір або провідність випромінювання, логарифмічний декремент вгамування, частотна характеристика, смуга пропускання частот, діюча довжина, діюча площа, ефективна температура антени і т. ін.

Для даної антени проводяться діапазонні дослідження наступних параметрів: діаграми спрямованості (ДС) та вхідного опору.

#### 3.1 Дослідження діаграми спрямованості

Характеристика спрямованості і ДС антени визначаються розподілом поля випромінювання в просторі. Але випромінювання антени описується чотирма множниками, один з яких передає залежність інтенсивності поля від координатних кутів. Отже, такий множник характеризує розподіл поля в просторі. Залежність інтенсивності електромагнітного поля від координатних кутів називається ХС. В загальному випадку, якщо ХС визначає просторову залежність інтенсивності складових  $E$  або  $H$  електромагнітного поля, вживається  $f(\theta, \varphi)$ . Якщо максимум цієї

функції приведеній до одиниці, то ХС вважається нормованою і позначається через  $F(\theta, \varphi)$ . Графічне зображення ХС називається діаграмою спрямованості.

Двомірні ДС зображаються, головним чином, в полярній або декартовій системі координат. На рис. 3.1,а зображена багатопелюсткова ДС напрямленої антени в полярній системі координат, а на рис. 3.1,б - в декартовій системі координат. Як видно з рис. 3.1, ДС може мати декілька пелюсток. Якщо в багатопелюстковій ДС одна пелюстка є найбільшою, то її називають головною пелюсткою. Решту називають бічними пелюстками.

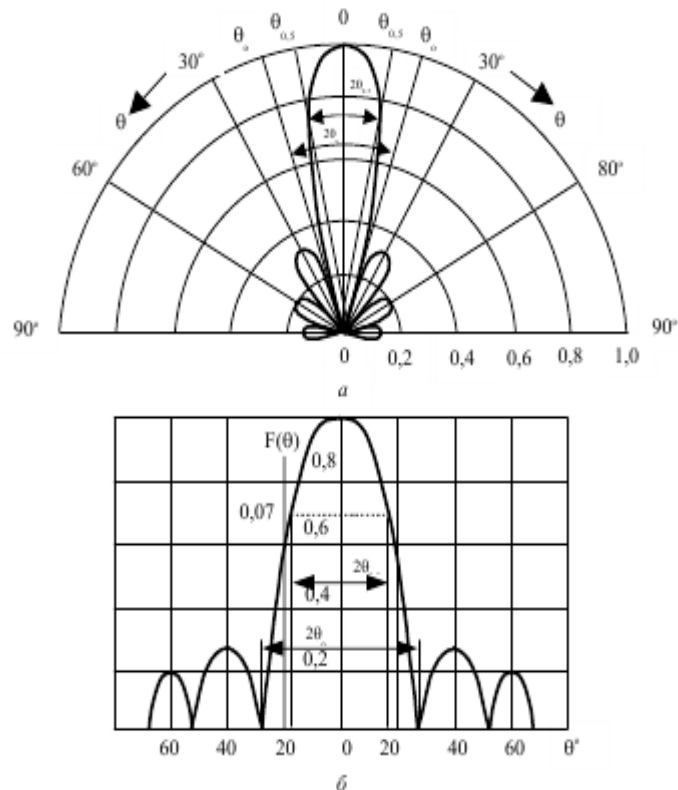


Рисунок 3.1 – Багатопелюсткова ДС напрямленої антени

В дипломній роботі проводиться дослідження діаграми спрямованості хвилевідно-щілинної антени в дев'яти випадках з діапазону частот 2..6 ГГц.

$$f_1 = 2 \text{ ГГц}, \lambda_1 = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^9} = 150(\text{мм})$$



$$k = \frac{2\pi}{150} = 0,041, \quad \psi = 0,041 \cdot 50 \cdot \sin \theta, \quad \text{тоді}$$

$$F_1(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta} \cdot \frac{\sin\left(\frac{23}{2} \cdot 0,041 \cdot 50 \cdot \sin \theta\right)}{23 \cdot \sin\left(\frac{0,041 \cdot 50 \cdot \sin \theta}{2}\right)}.$$

За допомогою програмного пакета Mathcad 14 будуються діаграми спрямованості:

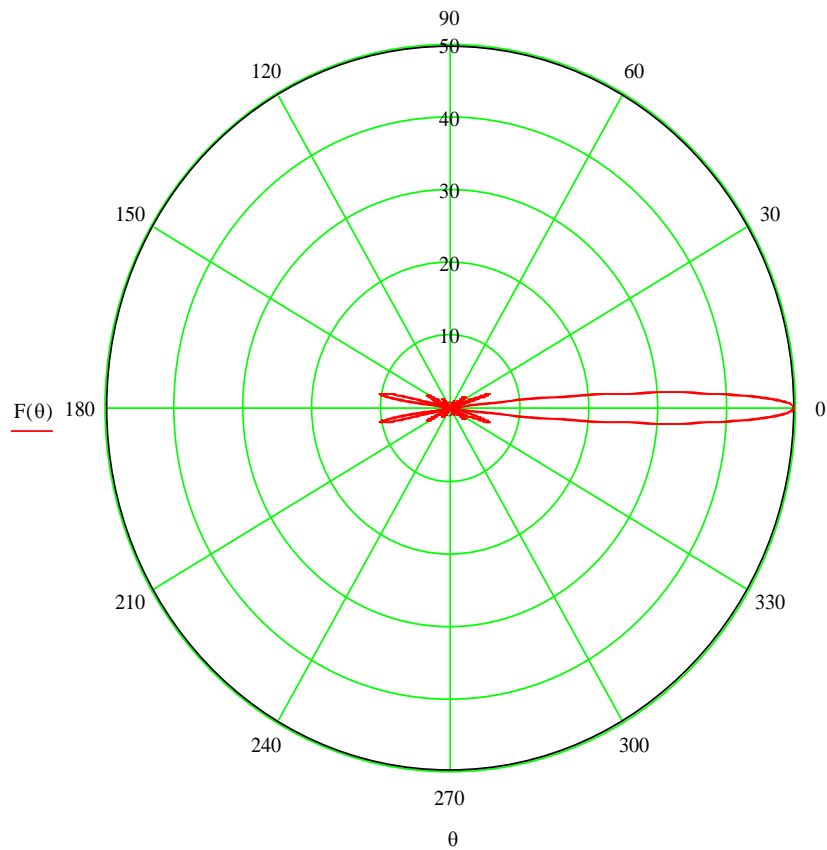


Рисунок 3.2 – ДС ХЩА на частоті 2 ГГц в полярній системі координат

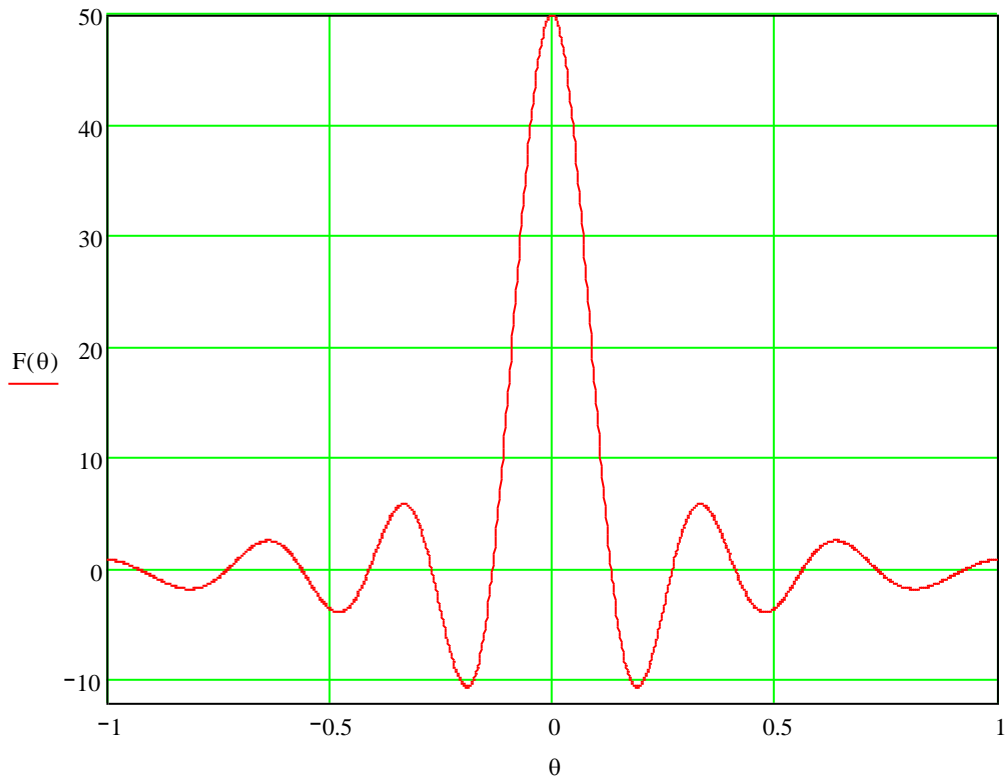


Рисунок 3.3 – ДС ХЩА на частоті 2 ГГц в декартовій системі координат

$$f_2 = 2,5 \text{ ГГц}, \quad \lambda_2 = \frac{3 \cdot 10^8}{2,5 \cdot 10^9} = 120(\text{мм})$$

$$k = \frac{2\pi}{150} = 0,052, \quad \psi = 0,052 \cdot 50 \cdot \sin \theta, \quad \text{тоді}$$

$$F_2(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta} \cdot \frac{\sin\left(\frac{23}{2} \cdot 0,052 \cdot 50 \cdot \sin \theta\right)}{23 \cdot \sin\left(\frac{0,052 \cdot 50 \cdot \sin \theta}{2}\right)}$$

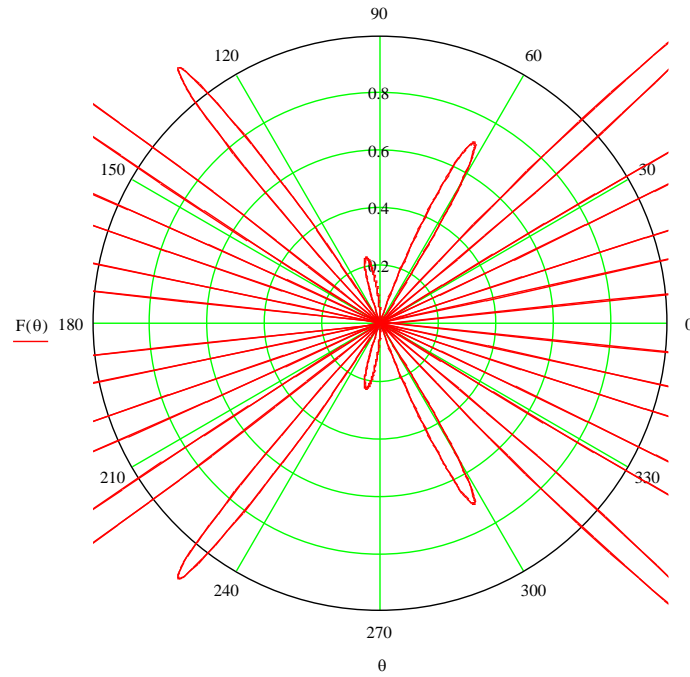


Рисунок 3.4 – ДС ХЩА на частоті 2,5 ГГц в полярній системі координат

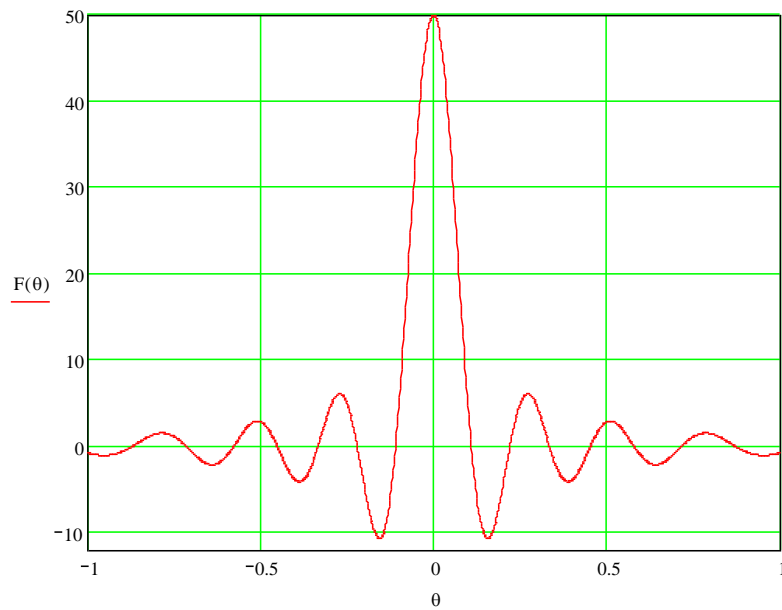


Рисунок 3.5 – ДС ХЩА на частоті 2,5 ГГц в декартовій системі координат

$$f_3 = 3 \text{ ГГц}, \quad \lambda_3 = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9} = 100 (\text{мм})$$

$$k = \frac{2\pi}{100} = 0,062, \quad \psi = 0,062 \cdot 50 \cdot \sin \theta, \quad \text{тоді}$$

$$F_3(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta\right) \sin\left(\frac{23}{2} \cdot 0,062 \cdot 50 \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta \cdot 23 \cdot \sin\left(\frac{0,062 \cdot 50 \cdot \sin \theta}{2}\right)}$$

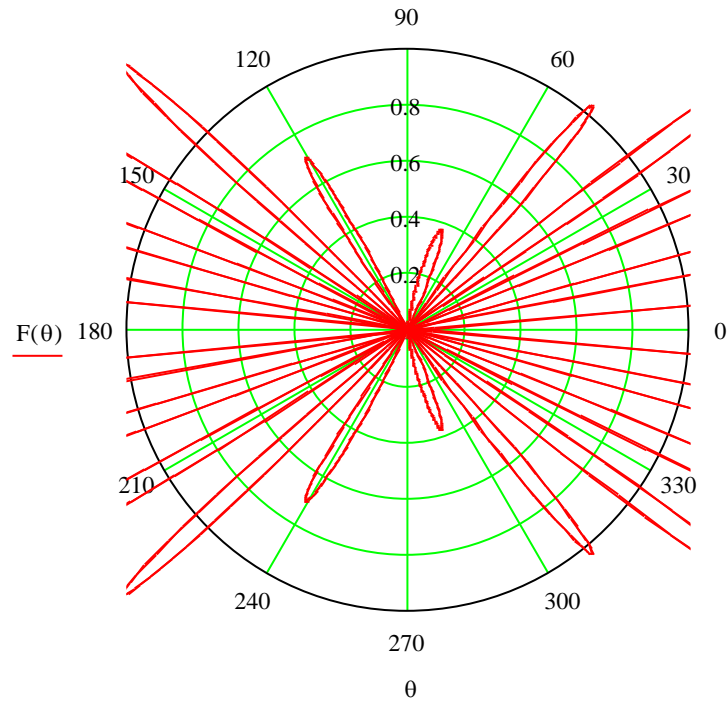


Рисунок 3.6 – ДС ХЩА на частоті 3 ГГц в полярній системі координат

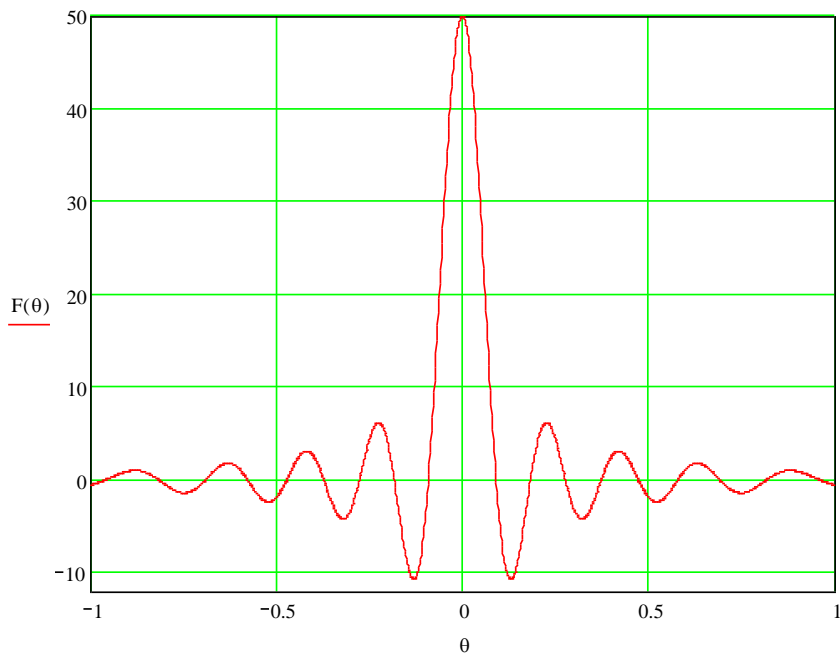


Рисунок 3.7 – ДС ХЩА на частоті 3 ГГц в декартовій системі координат

$$f_4 = 3,5 \text{ ГГц}, \quad \lambda_4 = \frac{3 \cdot 10^8}{3,5 \cdot 10^9} = 85 (\text{мм})$$

$$k = \frac{2\pi}{85} = 0,073, \quad \psi = 0,073 \cdot 50 \cdot \sin \theta, \quad \text{тоді}$$

$$F_4(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta\right) \sin\left(\frac{23}{2} \cdot 0,073 \cdot 50 \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta \cdot 23 \cdot \sin\left(\frac{0,073 \cdot 50 \cdot \sin \theta}{2}\right)}$$

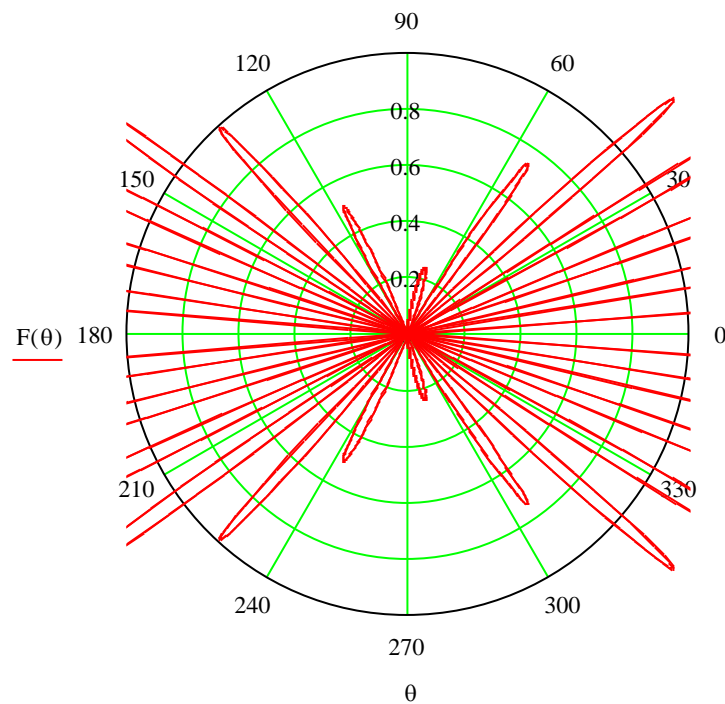


Рисунок 3.8 – ДС ХЩА на частоті 3,5 ГГц в полярній системі координат

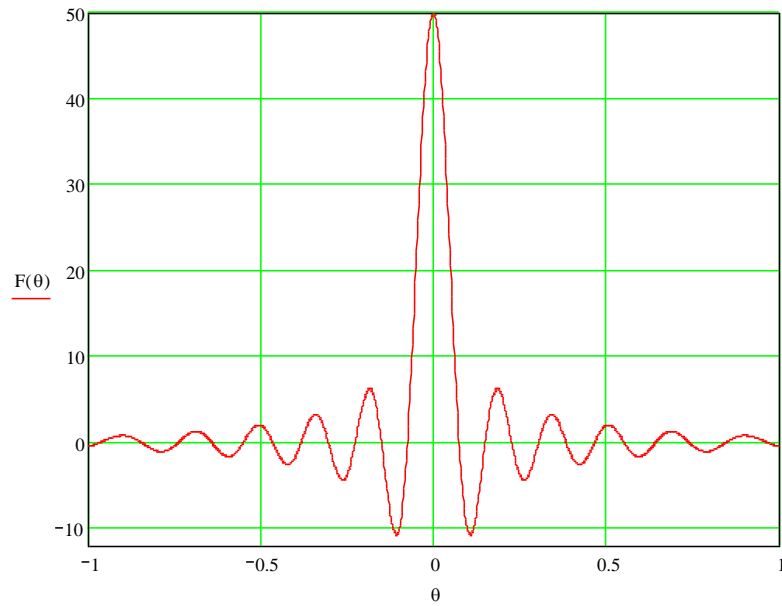


Рисунок 3.9 – ДС ХЩА на частоті 3,5 ГГц в декартовій системі координат

$$f_5 = 4 \text{ ГГц}, \quad \lambda_5 = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^9} = 75 (\text{мм})$$

$$k = \frac{2\pi}{75} = 0,083, \quad \psi = 0,083 \cdot 50 \cdot \sin \theta, \quad \text{тоді}$$

$$F_5(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta\right) \cdot \sin\left(\frac{23}{2} \cdot 0,083 \cdot 50 \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta \cdot 23 \cdot \sin\left(\frac{0,083 \cdot 50 \cdot \sin \theta}{2}\right)}$$

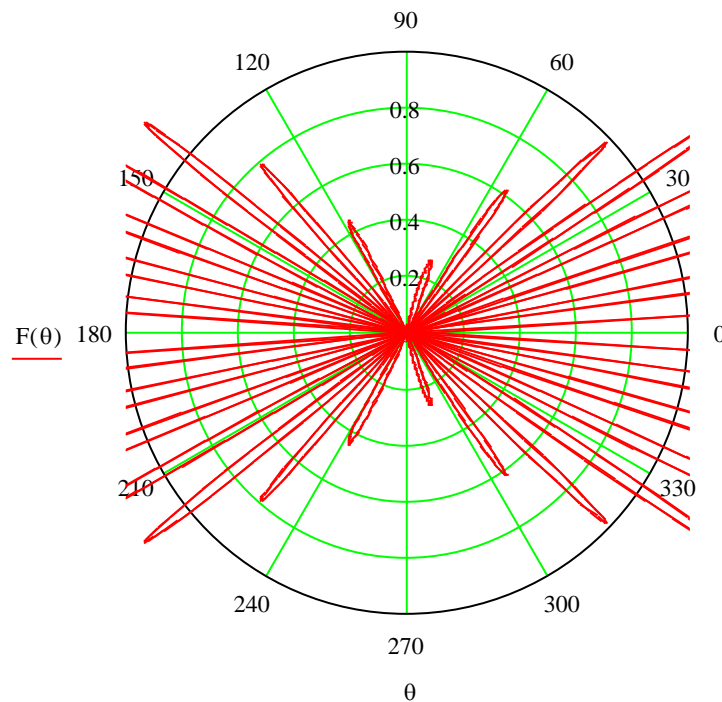


Рисунок 3.10 – ДС ХЩА на частоті 4 ГГц в полярній системі координат

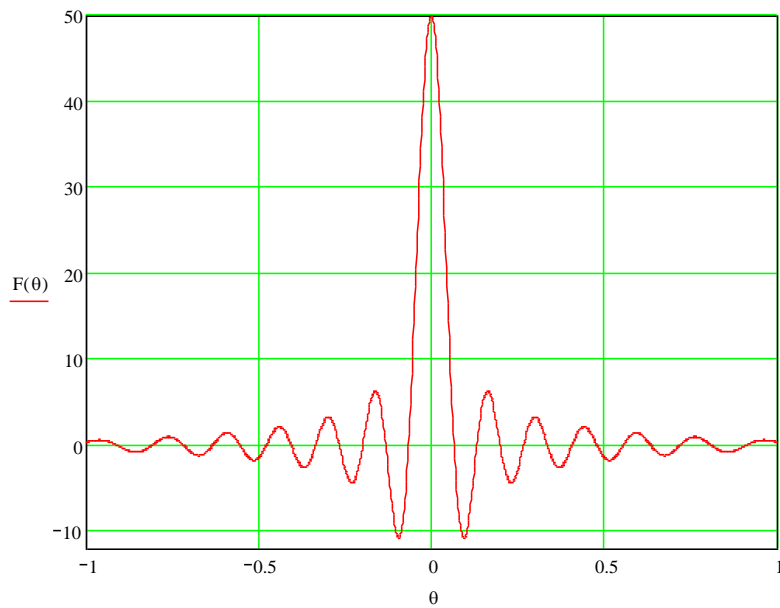


Рисунок 3.11 – ДС ХЦА на частоті 4 ГГц в декартовій системі координат

$$f_6 = 4,5 \text{ ГГц, згідно з (2.16) } \lambda_6 = \frac{3 \cdot 10^8}{4,5 \cdot 10^9} = 66 \text{ (мм)}$$

$$k = \frac{2\pi}{66} = 0,094, \quad \psi = 0,094 \cdot 50 \cdot \sin \theta, \text{ тоді}$$

$$F_6(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta\right) \sin\left(\frac{23}{2} \cdot 0,094 \cdot 50 \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta \cdot 23 \cdot \sin\left(\frac{0,094 \cdot 50 \cdot \sin \theta}{2}\right)}$$

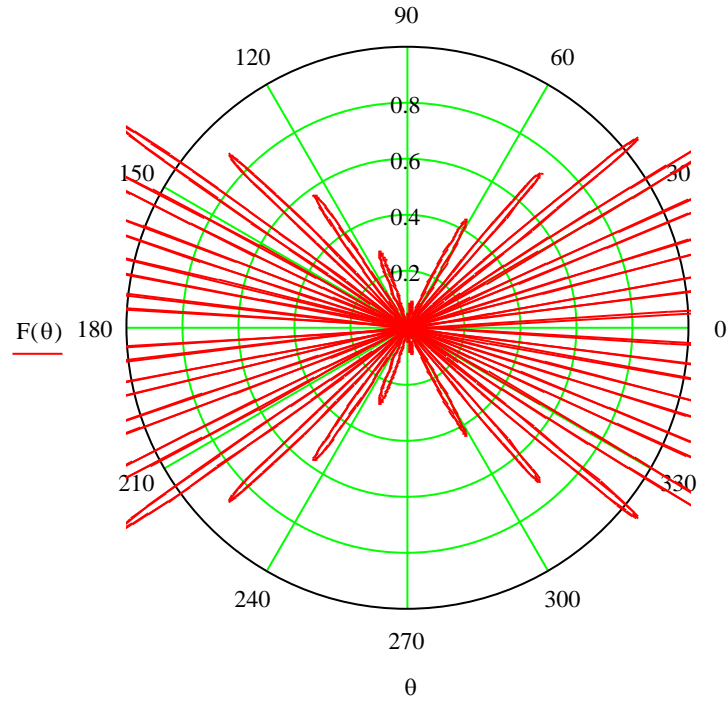


Рисунок 3.12 – ДС ХЩА на частоті 4,5 ГГц в полярній системі координат

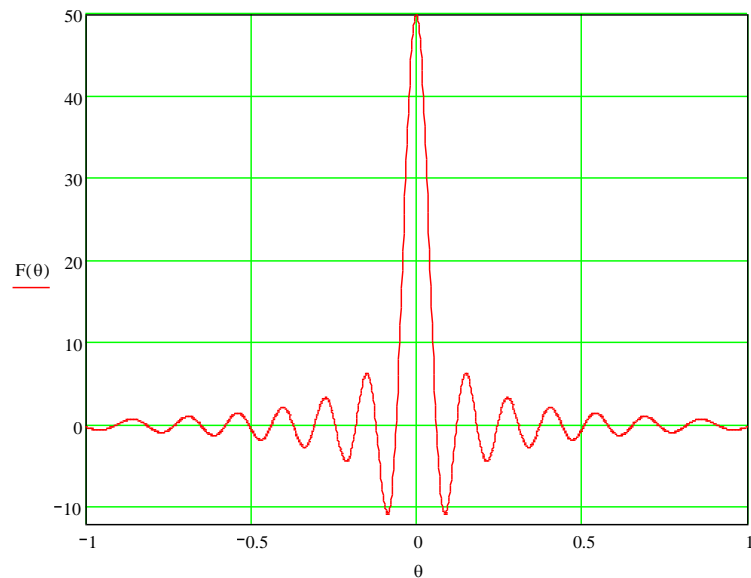


Рисунок 3.14 – ДС ХЩА на частоті 4,5 ГГц в декартовій системі координат

$$f_7 = 5 \text{ ГГц, згідно з (2.16) } \lambda_7 = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^9} = 60(\text{мм})$$



$$k = \frac{2\pi}{60} = 0,1, \quad \psi = 0,1 \cdot 50 \cdot \sin \theta, \quad \text{тоді}$$

$$F_7(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta} \cdot \frac{\sin\left(\frac{23}{2} \cdot 0,1 \cdot 50 \cdot \sin \theta\right)}{23 \cdot \sin\left(\frac{0,1 \cdot 50 \cdot \sin \theta}{2}\right)}$$

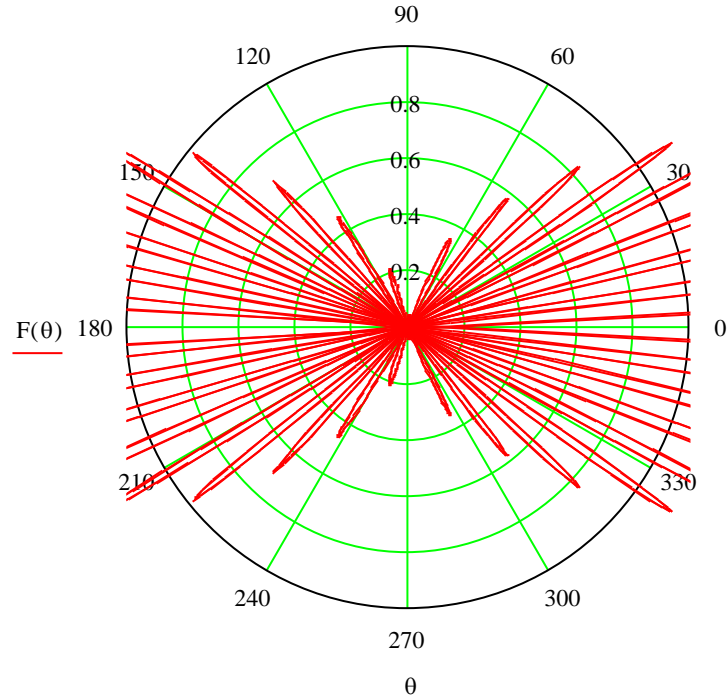


Рисунок 3.15 – ДС ХЩА на частоті 5 ГГц в полярній системі координат

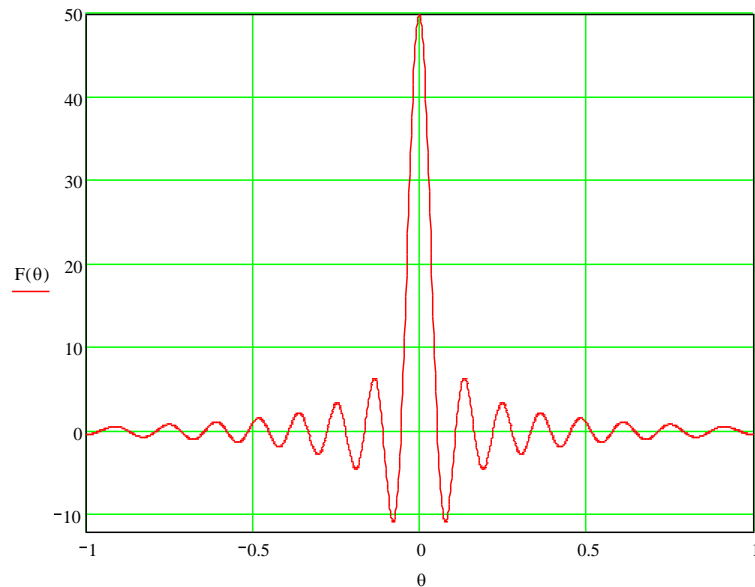


Рисунок 3.16 – ДС ХЩА на частоті 5 ГГц в декартовій системі координат

$$f_8 = 5,5 \text{ ГГц, згідно з (2.16) } \lambda_8 = \frac{3 \cdot 10^8}{5,5 \cdot 10^9} = 54 \text{ (мм)}$$

$$k = \frac{2\pi}{54} = 0,11, \quad \psi = 0,11 \cdot 50 \cdot \sin \theta, \quad \text{тоді}$$

$$F_8(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta} \cdot \frac{\sin\left(\frac{23}{2} \cdot 0,11 \cdot 50 \cdot \sin \theta\right)}{23 \cdot \sin\left(\frac{0,11 \cdot 50 \cdot \sin \theta}{2}\right)}$$

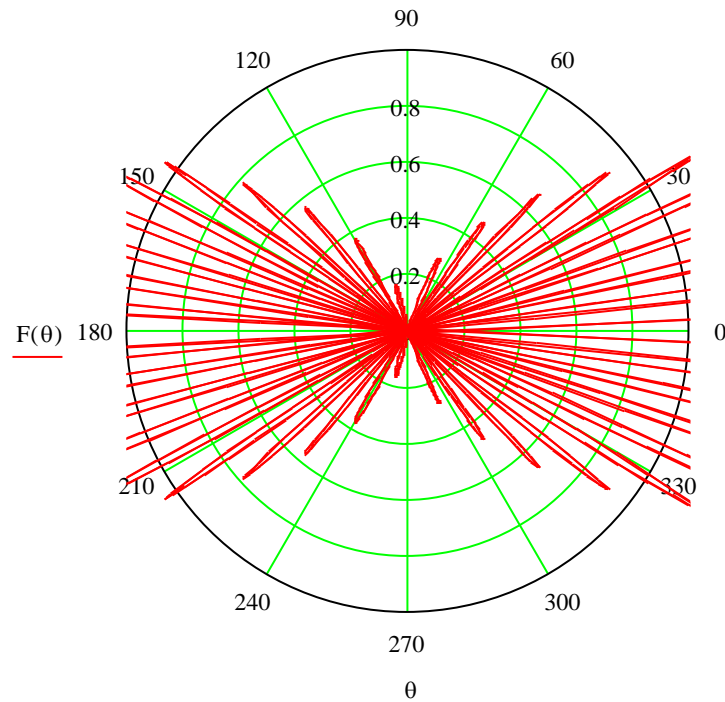


Рисунок 3.17 – ДС ХЩА на частоті 5,5 ГГц в полярній системі координат

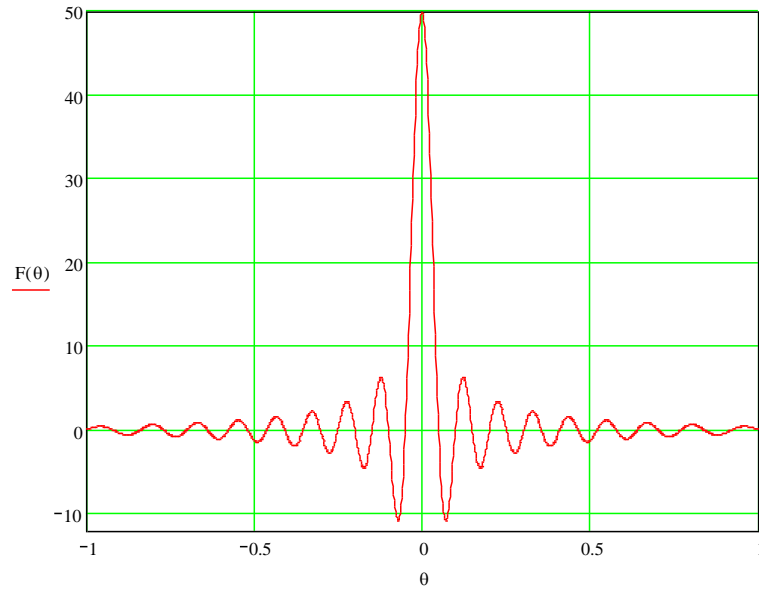


Рисунок 3.18 – ДС ХЩА на частоті 5,5 ГГц в декартовій системі координат

$$f_9 = 6 \text{ ГГц}, \quad \lambda_9 = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^9} = 50 (\text{мм})$$

$$k = \frac{2\pi}{50} = 0,12, \quad \psi = 0,12 \cdot 50 \cdot \sin \theta, \quad \text{тоді}$$

$$F_9(\theta) = \frac{\cos\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta} \cdot \frac{\sin\left(\frac{23}{2} \cdot 0,12 \cdot 50 \cdot \sin \theta\right)}{23 \cdot \sin\left(\frac{0,12 \cdot 50 \cdot \sin \theta}{2}\right)}$$

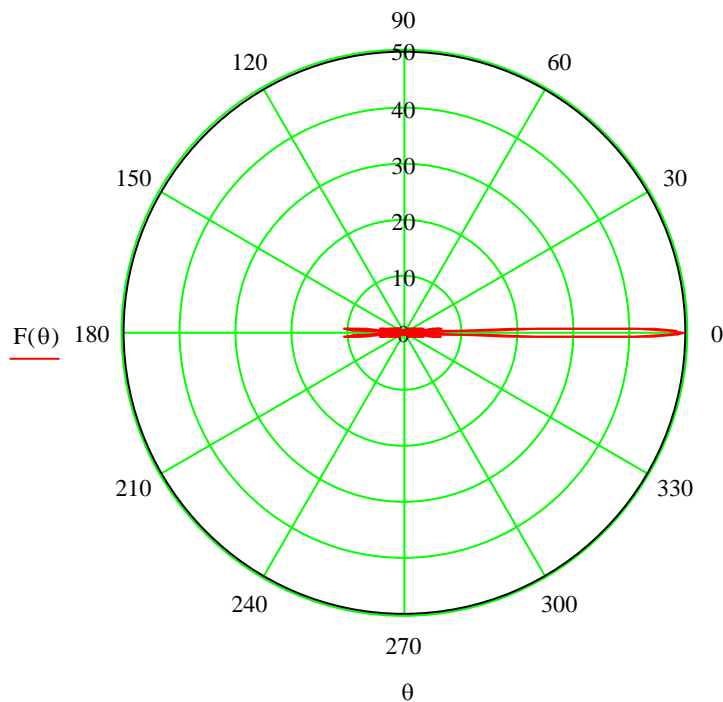


Рисунок 3.19 – ДС ХЩА на частоті 6 ГГц в полярній системі координат

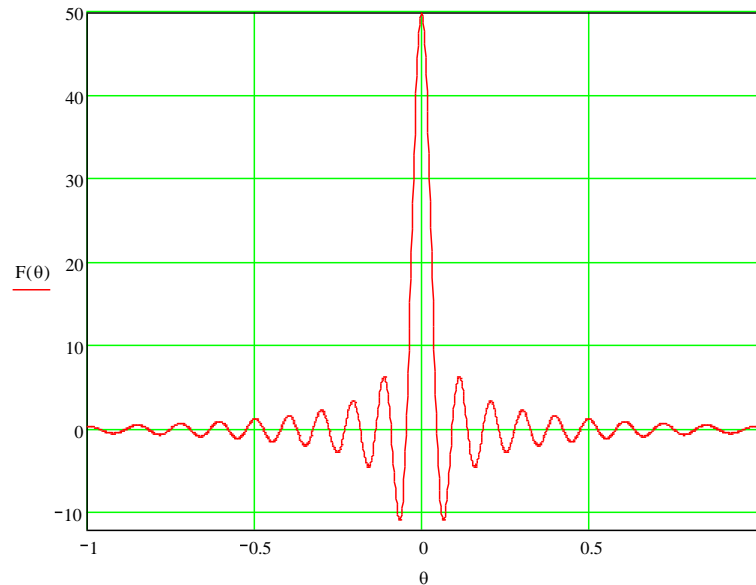


Рисунок 3.20 – ДС ХЩА на частоті 6 ГГц в декартовій системі координат

### 3.2 Дослідження вхідного опору

Вхідний опір - це навантаження для фідера, який живить антену. Вхідний опір антени має велике значення при встановленні режиму роботи фідера та генератора. Потужність, що підводиться для живлення антени, визначається через вхідний опір і модуль струму на вході антени.

Вхідний опір досліджуваної антени визначається згідно виразу:

$$R_{ex} = \frac{2\rho_{xв}h_D^2}{a \cdot b} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{a} \cdot x_1\right) \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi f}{c} \cdot l_1\right),$$

де  $\rho_{xв} = 538(\text{Ом})$  –характеристичний опір хвилеводу;

$h_D = 8,7(\text{мм})$  – діюча висота штиря;

$a = 47,55(\text{мм})$ ,  $b = 22,149(\text{мм})$  – розміри хвилеводу;

$x_1 = 23,77$  – положення штиря в хвилеводі відносно широкої стінки;

$l_1 = 25$  (мм) – довжина відрізка хвилеводу від штиря до замороченої стінки.

За допомогою програмного пакета Mathcad 14 будується залежність вхідного опору антени від частоти:

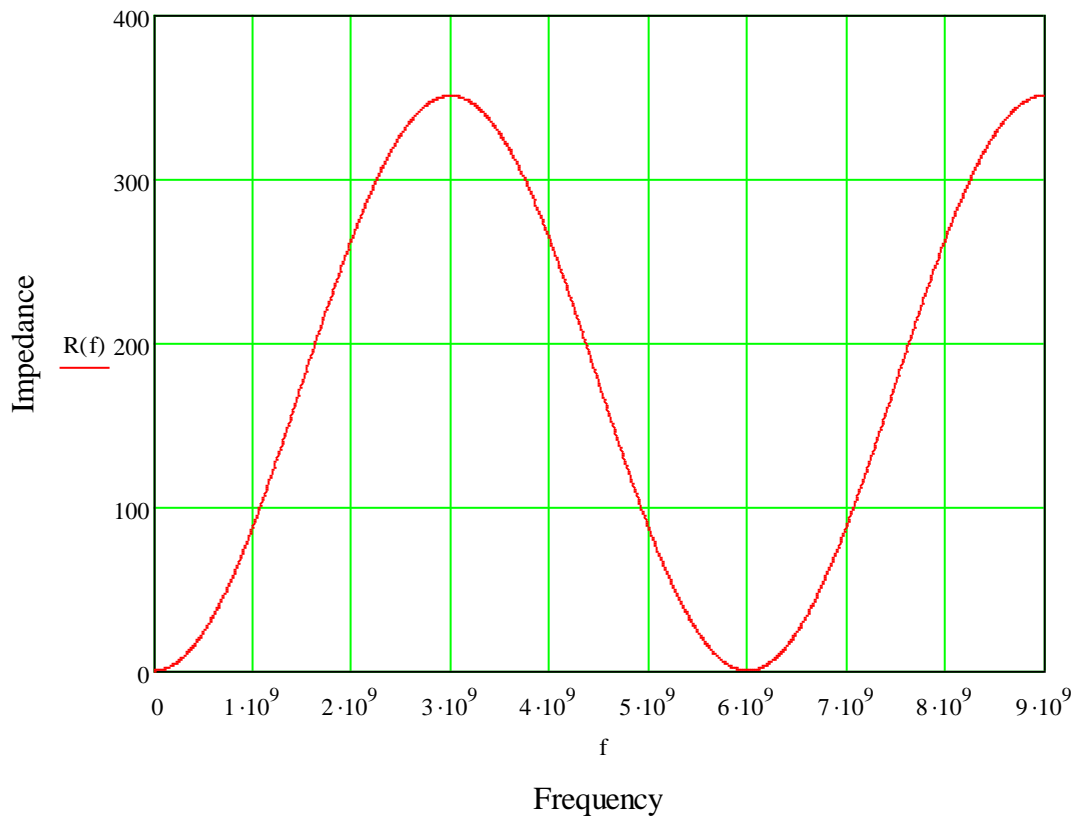


Рисунок 3.21 – Залежність вхідного опору антени від частоти

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

На початковому етапі розвитку охорони праці захист організму працюючої людини вирішувався на стадії виробництва. Із цією метою здійснювався аналіз шкідливих і небезпечних чинників виробництва, які загрожували життю й здоров'ю людей і могли призвести до нещасного випадку. На підставі цих даних розроблялися інженерні рішення щодо захисту працюючих.

З розвитком продуктивних сил та під впливом науково-технічного прогресу цей шлях вирішення проблем охорони праці перестав відповідати нагальним вимогам техносфери. Виникла необхідність у глибокому вивченні біологічної, фізичної і хімічної сутності впливу шкідливих і небезпечних чинників, у прогнозуванні їх виникнення, щоб завчасно на підставі фундаментальних, технічних і медичних наук впроваджувати заходи захисту від них на стадії проектування, конструювання й виробничої експлуатації.

Нині проблеми охорони праці вирішуються на національному рівні в масштабах держави. Основна увага приділяється усуненню шкідливого впливу технологічних процесів на організм людини шляхом оздоровлення умов праці на виробництві.

На працівника під час дослідження резонансної хвилевідно-щілинної антени з синфазним збудженням щілин, могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

### 1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- пряма і відбита блискість;
- підвищення яскравість;

- недостатня освітленість робочої зони;
- .2. Психофізіологічні:
  - статичне перевантаження;
  - розумове перевантаження;
  - емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

#### 4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Велике значення має характер роботи. Зокрема, при організації робочого місця проектувальника за ПК були дотримані наступні основні умови:

- оптимальне розміщення обладнання, що входить до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні рухи і переміщення;
- необхідно природне і штучне освітлення для виконання поставлених завдань;
- рівень акустичного шуму не повинен перевищувати допустимого значення.

Площа приміщення на одне робоче місце користувача повинна становити  $6 \text{ м}^2$ , а об'єм не менше ніж  $20 \text{ м}^3$ .

Головними елементами робочого місця проектувальника за ПК є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Рациональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібно для виконання робіт частіше, розташовано в зоні легкої досяжності робочого простору.

Максимальна зона досяжності рук – це частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, що описуються максимально витягнутими руками

при русі їх у плечовому суглобі.

Оптимальна зона – частина моторного поля робочого місця, обмеженого дугами, описуваними передпліччя при русі в ліктьових суглобах з опорою в точці ліктя і з відносно нерухомим плечем.

При роботі в положенні сидячи рекомендуються такі параметри робочого простору:

- ширина не менше 700 мм;
- глибина не менше 400 мм;
- висота робочої поверхні столу над статтю 700-750 мм.

Оптимальними розмірами столу є:

- висота 710 мм;
- довжина столу 1300 мм;
- ширина столу 650 мм.

Під робочою поверхнею повинно бути передбачено простір для ніг:

- висота не менше 600 мм;
- ширина не менше 500 мм;
- глибина не менше 400 мм.

Робочі місця з ПК повинні бути розташовані від стіни з вікнами на відстані не менш ніж 1,5 м, від інших стін - на відстані не менше ніж 1 м. При розміщенні робочого місця поряд з вікном кут між екраном монітора і площиною вікна повинен складати не менше  $90^0$  (для виключення відблисків), частину вікна, що прилягає, бажано зашторити. Недопустиме розташування ПК, при якому працюючий повернений обличчям або спиною до вікон кімнати або до задньої частини ПК, в яку монтуються вентилятори. При розміщенні робочих столів з ПК слід дотримуватись таких відстаней: між бічними поверхнями ПК – 1,2 м, від тильної поверхні одного ПК до екрана іншого ПК – 2,5 м.

Приміщення, де здійснювалося проектування резонансної хвилевіднощільної антени з синфазним збудженням щілин за небезпекою ураження електричним струмом можна віднести до 1 класу, тобто це приміщення без



підвищеної небезпеки [15].

Електротехнічне устаткування: апаратури, кабелі й керівництва, розподільні пристрої всіх видів і напруг по своїх номінальних параметрах задовольняє умовам роботи як при нормальних режимах, так і при коротких замиканнях, перенапругах, перевантаженнях.

Для забезпечення безпеки встановлюються наступні технічні рішення:

- Забезпечено недоступність струмопровідних частин (застосована схована проводка, кабель прокладений у спеціальних ринвах).
- Забезпечено ізолювання струмопровідних частин з використанням ізоляції, опір якої не нижче 1кОм/В, передбачені постійний контроль і профілактика ізоляції.
- Розподільні шафи, пускові пристрої й клемні коробки закритого типу (розміщаються в спеціальних кожухах) - для забезпечення недоступності неізольованих струмопровідних частин.
- Напруга освітлювальної мережі приймається 220 В із заземленою нейтраллю.

## 4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 4.2.1 Мікроклімат

Основним нормативним документом, що регламентує параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [16]. Цей документ встановлює оптимальні і допустимі значення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, допустиму температуру внутрішніх поверхонь приміщення (стіни, стеля, підлога) і зовнішніх поверхонь технологічного обладнання, а також допустиму інтенсивність теплового випромінювання нагрітих поверхонь у приміщенні та відкритих джерел тепла (нагрітий метал, скло, відкритий вогонь тощо) для робочої зони — визначеного простору, в

якому знаходяться робочі місця постійного або непостійного (тимчасового) перебування працівників

Робота над резонансною хвилевідно-щілинною антеною з синфазним збудженням щілин за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [17]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено:

1. У холодний період року для обігріву будівлі використовується централізована парова система опалення.
2. Забезпечення допустимих метеорологічних умов праці в приміщенні здійснюється за допомогою системи кондиціонування.
3. Систематичне (раз за зміну) вологе прибирання.

#### 4.2.2. Склад повітря робочої зони

У сучасній техніці застосовується безліч речовин, які можуть потрапляти в повітря і становити небезпеку здоров'ю людей. Залежно від ступеня токсичності, фізико-хімічних властивостей, шляхів проникнення в організм, санітарні норми встановлюють гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони виробничих приміщень, перевищення яких неприпустиме.

В приміщенні, де здійснюється проектування резонансної хвилевідно-щілинної антени з синфазним збудженням щілин можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи (раціональна організація проведення робіт залежно від пори року і доби, чергування праці і відпочинку), так і технічні засоби (вентиляція, кондиціонування повітря, опалювальна система).

#### 4.2.3 Виробниче освітлення

Стан освітлення виробничих приміщень відіграє важливу роль і для попередження виробничого травматизму. Багато негасних випадків на виробництві стається через погане освітлення. Втрати від цього становлять досить значні суми, а, головне, людина може загинути або стати інвалідом. Раціональне освітлення повинно відповідати таким умовам: бути достатнім (відповідним нормі); рівномірним; не утворювати тіней на робочій поверхні; не засліплювати працюючого; напрямок світлового потоку повинен відповідати зручному виконанню роботи. Це сприяє підтримці високого рівня працездатності, зберігає здоров'я людини та зменшує травматизм.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [18]) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 4.3.

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

Таблиця 4.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір розрізювання	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, Лк		КПО, $e_n$ , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	V0,15 - до 0,3	II	Г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

#### 4.2.4 Виробничий шум

Шум – це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю корисних сигналів і негативно впливають на людину. Фізична сутність звуку – це механічні коливання пружного середовища (повітря, рідини). Під час звукових коливань утворюються області зниженого і підвищеного тиску, що діють на слуховий аналізатор (мембрану вуха).

Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки – дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності.

Шум має акумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, все сильніше пригнічують нервову систему. Тому перед втратою слуху від впливу шумів виникає функціональний розлад центральної нервової системи. Особливо шкідливий вплив шуму позначається на нервово-психічній діяльності людини.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [19]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

#### 4.2.5 Виробничі випромінювання

Працюючи за комп'ютером, користувач підпадає під вплив високочастотного електромагнітного поля (ЕМП). Як показують результати вимірювання електромагнітного випромінювання, інтенсивність опромінення

ЕМП від комп'ютера підсилюється, коли одночасно оператор ще й розмовляє по мобільному телефону.

Люди, які працюють в ЕМП, що перевищує допустимі норми, швидко втомлюються, скаржаться на головні болі, загальну слабкість, болі в ділянці серця. Вони стають дратівливими, у них збільшується пітливість та порушується нічний сон. Відтак, захист від ЕМВ не лише покращить самопочуття працівників, але і допоможе створити більш сприятливі умови для праці.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В / м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	20кВ / м
для дорослих користувачів	
для дітей дошкільних установ і що вчаться середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	15кВ / м

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати монітори із зниженим рівнем випромінювання, встановлювати захисні екрани, а також дотримуватися регламентованих режимів праці та відпочинку.

### 4.3 Пожежна безпека

Забезпечення пожежної безпеки на підприємстві покладається на його керівника (власника). В свою чергу, наказом по підприємству він визначає обов'язки інженерно-технічного персоналу та працівників щодо забезпечення пожежної безпеки на ділянках підприємства. Керівник також призначає відповідальних за пожежну безпеку окремих будівель, споруд, приміщень та експлуатацію технічних засобів протипожежного захисту. Якщо на підприємстві не призначено спеціально уповноваженої особи відповідальної за загальну пожежну безпеку підприємства, то організаційну роботу з підготовки зазначених документів здійснює, як правило, спеціаліст з охорони праці.

Обов'язки щодо забезпечення пожежної безпеки, утримання та експлуатації засобів протипожежного захисту мають бути відображені у відповідних посадових документах (функціональних обов'язках, інструкціях, положеннях тощо).

В приміщенні, де здійснювалася робота використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д». Пожежну небезпеку несуть у собі лише кабельні електропроводки до обладнання, що є припустимим для даної категорії приміщень [20].

За вогнестійкістю приміщення відноситься до другої категорії [20]. Робоча зона розробника відноситься до класу вибухонебезпечності В-Па та пожежонебезпечності П-Па, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилу і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності.

#### 4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні, де відбувається проектування резонансної хвилевідно-щілинної антени з синфазним збудженням щілин такі:

- несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників, пересихання електроізоляційних матеріалів);
- використання електропобутових пристроїв (електрочайники, обігрівачі); попадання вологи на працююче електрообладнання;
- залишення без нагляду увімкннутих комп'ютерів, обчислювальної техніки та інших електроприладів.

Для запобігання виникнення пожежі доцільні такі заходи:

- призначення осіб, що відповідальні за пожежну безпеку приміщення;
- щорічне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за пожежну безпеку;
- утримання в справному стані засобів протипожежного захисту;
- своєчасне інформування про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання тощо.

#### 4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

У приміщенні на випадок виникнення пожежі для обмеження її розповсюдження знаходиться переносний вуглекислотний вогнегасник типу ОУ-5, що відповідає нормам. Підходи до засобів первинного пожежегасіння та відключення електросхем устаткування вільні.

У коридорі приміщення розташована схема евакуації людей при пожежі. Шляхи евакуації з відділу відповідають правилам пожежної безпеки. У будинку є два виходи, ширина коридору – 2-3 метри, ширина дверей – 0,8 м., двері відкриваються по ходу руху людей у випадку евакуації.

Інструкції та інші внутрішні документи підприємства з пожежної безпеки слід розробляються на основі діючих правил та інших державних нормативних актів з пожежної безпеки, виходячи зі специфіки пожежної небезпеки будівель, споруд, технологічних процесів, технологічного та виробничого обладнання.

В цілому приміщення по категорії вибухо- і пожежонебезпечності та



ступеню вогнестійкості відповідає нормам.

## ВИСНОВКИ

У бакалаврській дипломній роботі була розроблена та досліджена хвилевідно-щілинна антена.

Перевагою хвилевідно-щілинних антен є їх компактність, в таких антенах можуть бути реалізовані оптимальні ДС, так як розподіл поля в розкриві може вибиратися в широких межах за рахунок зміни зв'язку випромінювачів з хвилеводом. Щілинна антена має порівняно простий збуджуючий пристрій, вона проста в експлуатації.

Розробка таких антен, як хвилевідно-щілинні, є актуальною задачею, що пов'язано із стрімким розвитком радіолокації, радіонавігації та радіозв'язку, де вони широко застосовуються.

В результаті проведення розрахунків була досліджена хвилевідно-щілинна антена. Оскільки відношення  $\Delta f/f_{cp} < 10\%$  і складає 9,3%, то антену розраховано як резонансну з синфазним збудженням щілин.

Ширина головної пелюстки на рівні 200,5 складає приблизно 3,1%.- антена є вузько смуговою.

Антена має коефіцієнт спрямованої дії 90, коефіцієнт корисної дії приблизно 0,9, і коефіцієнт підсилення 100. Проте для забезпечення такого коефіцієнта спрямованої дії необхідна велика кількість щілин.

Також у бакалаврській дипломній роботі проведено розрахунки розділу безпеки життєдіяльності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рубцов І. Ю. Технічні аспекти побудови цифрових антенних решіток у системах зв'язку / І. Ю. Рубцов // Системи озброєння і військова техніка. - 2015. - № 3. - С. 139-143.
2. Ільницький Л.Я., Савченко О.Я., Сібрук Л.В. «Анени та пристрої надвисоких частот»: Підручник для ВНЗ/ За ред. Л.Я. Ільницького. – К: Укртелеком, 2003. – 496с.
3. Ільницький Л.Я., Сібрук Л.В., Щербина О.А. «Пристрої надвисоких частот та анени»: Навч. посібник. – К: НАУ, 2013. – 188с.
4. Ільницький Л.Я., Сібрук Л.В., Слоболлдянюк П.В., Благодарний В.Г. «Анени телекомунікаційних та моніторингових систем», За ред Л.Я. Ільницького. – К., 2012. – 240 с
5. Ільїнов М.Д. Антена базової станції з секторною діаграмою направленості в азимутальній площині / Ільїнов М.Д., Мацаєнко А.Н
6. Ільїнов М.Д., Толюпа С.В., Шацький І.О. Широкосекторна низько-профільна антена. // Науково- технічний журнал “Сучасний захист інформації”.– 2012. - №3. – С. 78-83
7. Sika Shrestha, Sun-Kuk Noh, Dong-You Choi Comparative Study of Antenna Designs for RF Energy Harvesting // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation, Volume, January 2013, 10 p.
8. 4. 2. Na Liu, Pengfei Yang, Weijiang Wang «Design of a Miniaturized Ultrawideband Compound Spiral Antenna» // School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, China – 2013.
9. 5. 6. Yangyi Zhao, Weidong Hu «Design Of A UWB Unidirectional Radiation
10. Compound Spiral Antenna» // Beijing Key Laboratory of Millimeter wave and Terahertz Technology, School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology Beijing, China – 2015.

11. Бугрова Т.І., Баранов В.А. Роль метаматеріалів у конструкції МІМО антен // Тиждень науки-2021. Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 21-23 квітня 2021 р. [Електронний ресурс] / Редкол.: В.В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ ЗП, 2021. – 1 електрон. опт.диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана.
12. Gurpinder Singh, Deepinder Singh “Design and analysis of conical horn antenna for Ku-band application.” International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online): 2319-7064
13. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с
14. НПА ОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: [http://sop.zp.ua/norm\\_prapor\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_prapor_0_00-7_15-18_01_ua.php).
15. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
16. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
17. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>
18. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>
19. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу:

<http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

20.ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: [http://www.poliplast.ua/doc/dbn\\_v.1.1-7-2002.pdf](http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf).

Додаток А  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ)  
РОБОТИ**

**РЕЗОНАНСНА ХВИЛЕВІДНО-ЩІЛИННА АНТЕНА  
З СИНФАЗНИМ ЗБУДЖЕННЯМ ЩІЛИН**

ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Резонансна хвилевідно-щілинна антена з синфазним збудженням щілин»

Тип роботи: БДР  
(БДР, МКР)

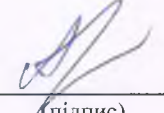
Підрозділ ІРТС, ІЕС  
(кафедра, факультет)

**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність 92,27% Схожість 7,73%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ✓ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку   
(підпис)

Олександр ЗВЯГІН  
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи   
(підпис)

Ярослав КРИШТОФОР  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи   
(підпис)

Андрій ВОЛОВИК  
(прізвище, ініціали)

Додаток Б  
(обов'язковий)

## ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

### РЕЗОНАНСНА ХВИЛЕВІДНО-ЩІЛИННА АНТЕНА З СИНФАЗНИМ ЗБУДЖЕННЯМ ЩІЛИН

Виконав: студент 4-го курсу, групи ТКР-196  
спеціальності 172 –

«Телекомунікації та радіотехніка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Кл

Криштофор Я. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІРТС

Воловик А. Ю.

(прізвище та ініціали)

« 19 » 06 2023 р.



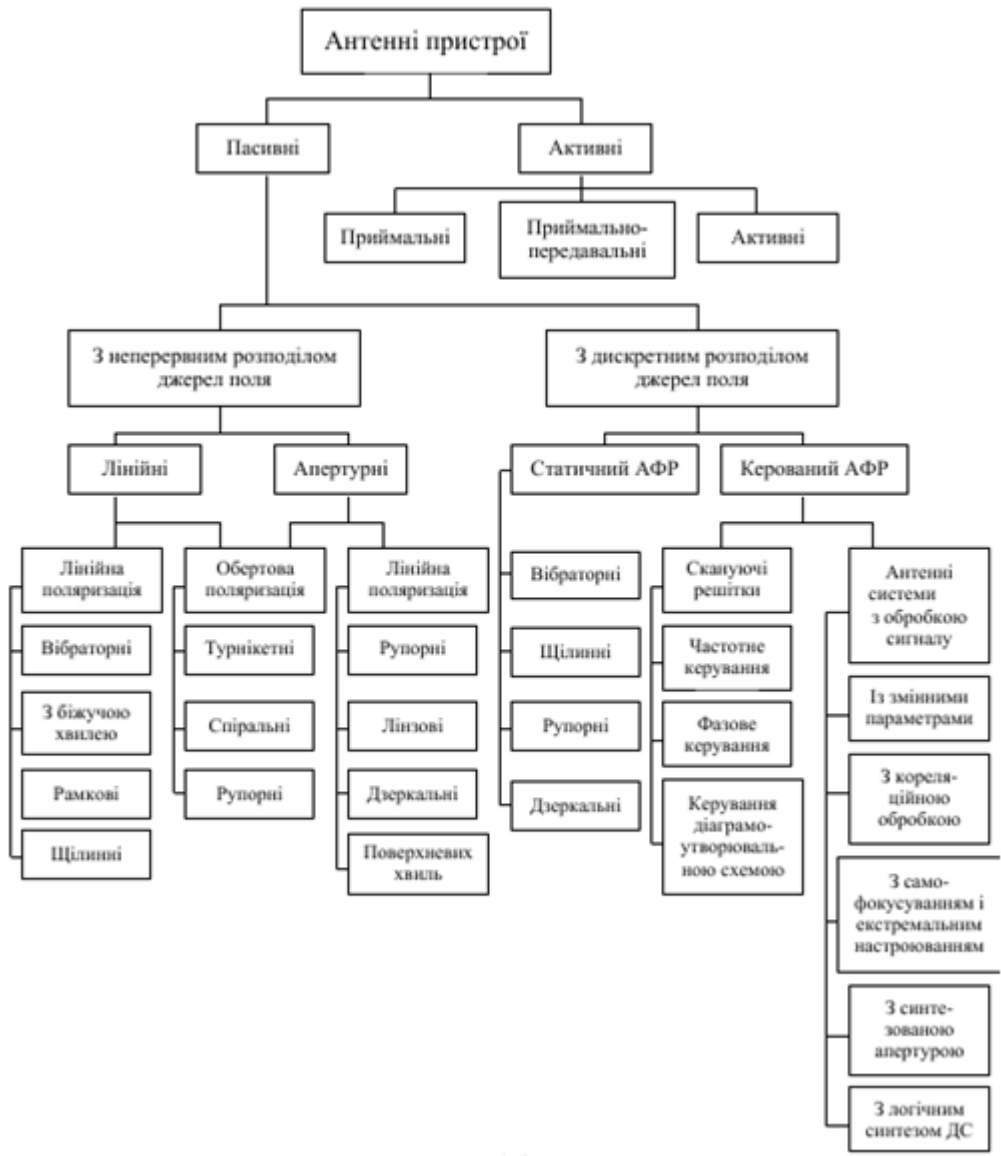


Рисунок 1 – Класифікація антен

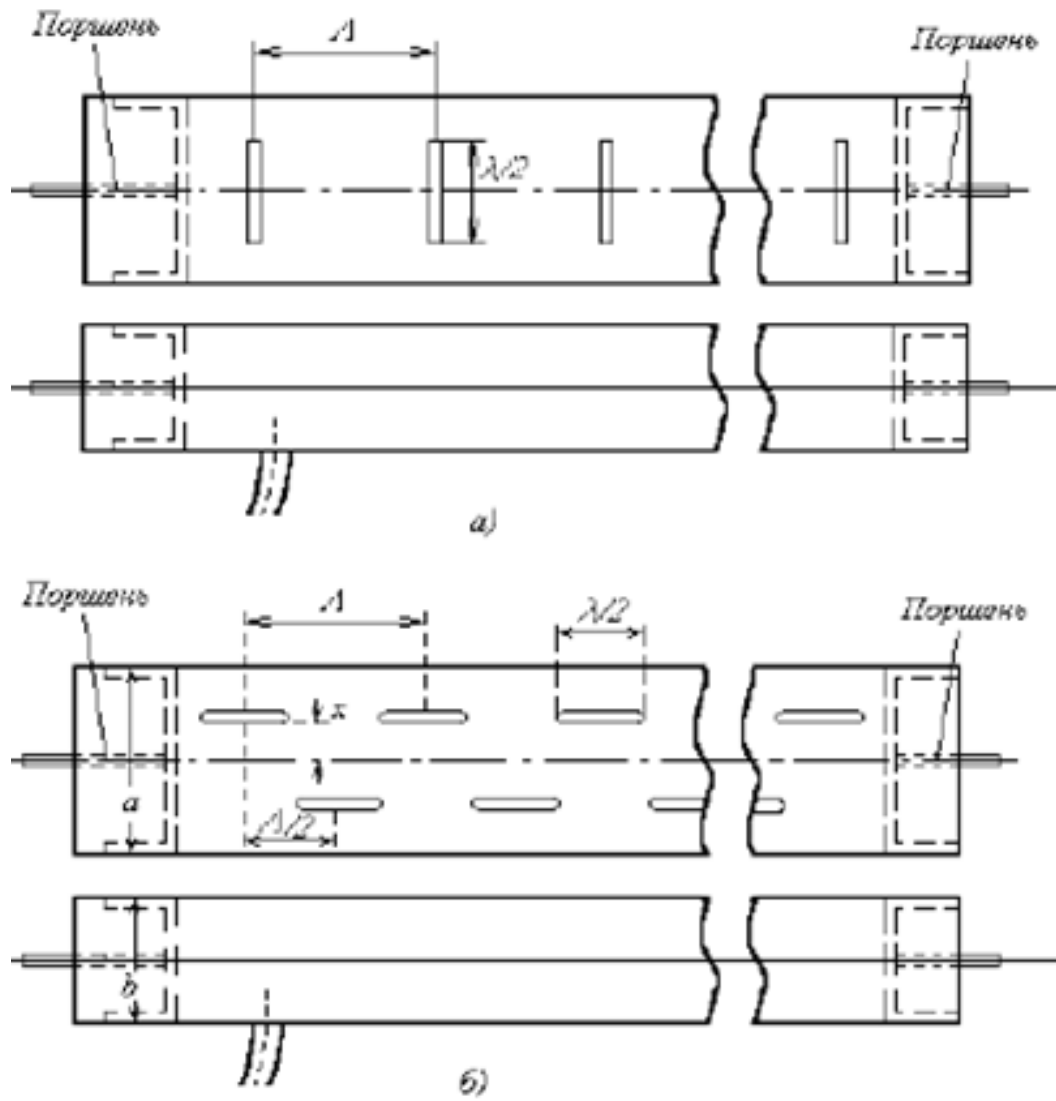


Рисунок 2 – Види щілин в резонансній хвилевідно-щілинній антені

## Розрахунок антени

Таблиця 1 – Параметри вибраного хвилеводу

Тип хвилеводу 153IE С	Діапазон частот нижчого типу хвилі, ГГц	Внутрішні розміри перерізу, мм			Товщина стінок мм	Зовнішні розміри перерізу, мм			Теорет. величина затухання (4,73 ГГц) Дб/м
		a	b	r		A	B	R	
R48	3,94- 5,99	47,55	22,149	0,8	1,625	50,8	25,4	1,05	0,0355

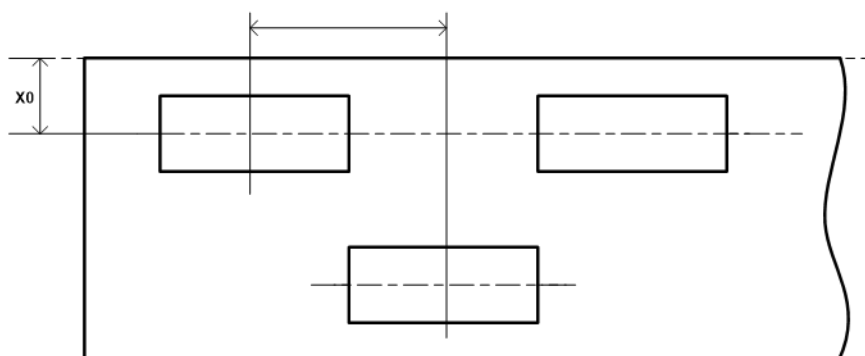


Рисунок 3 – Поздовжнє розміщення щілин в хвилеводі

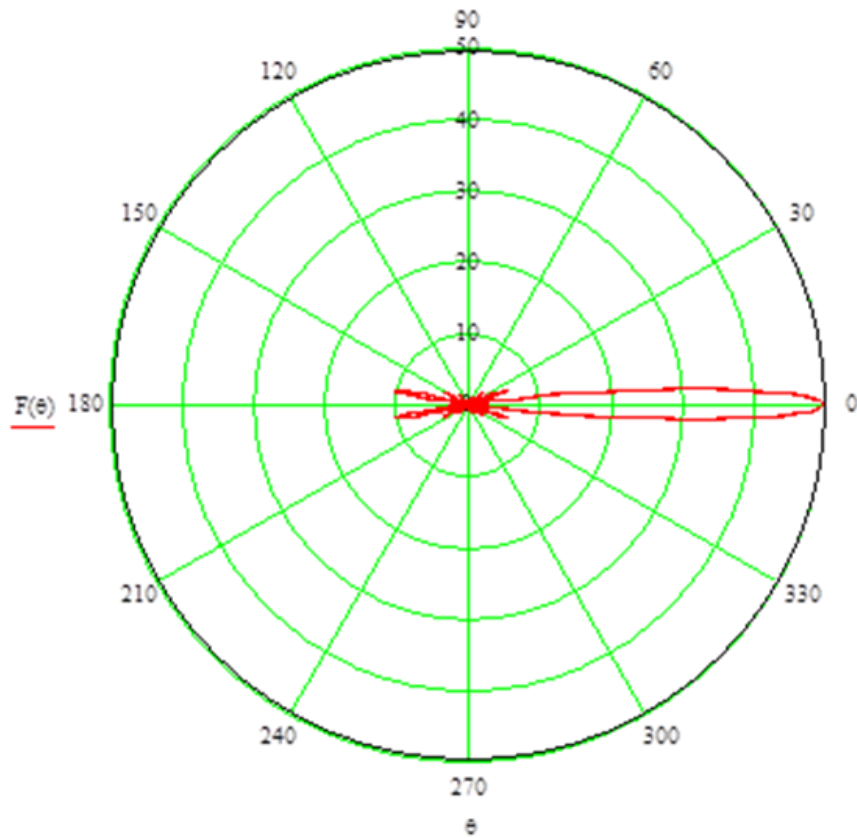


Рисунок 4 – Діаграма спрямованості хвилевідно-щільної антени в полярній системі координат на частоті 2 ГГц

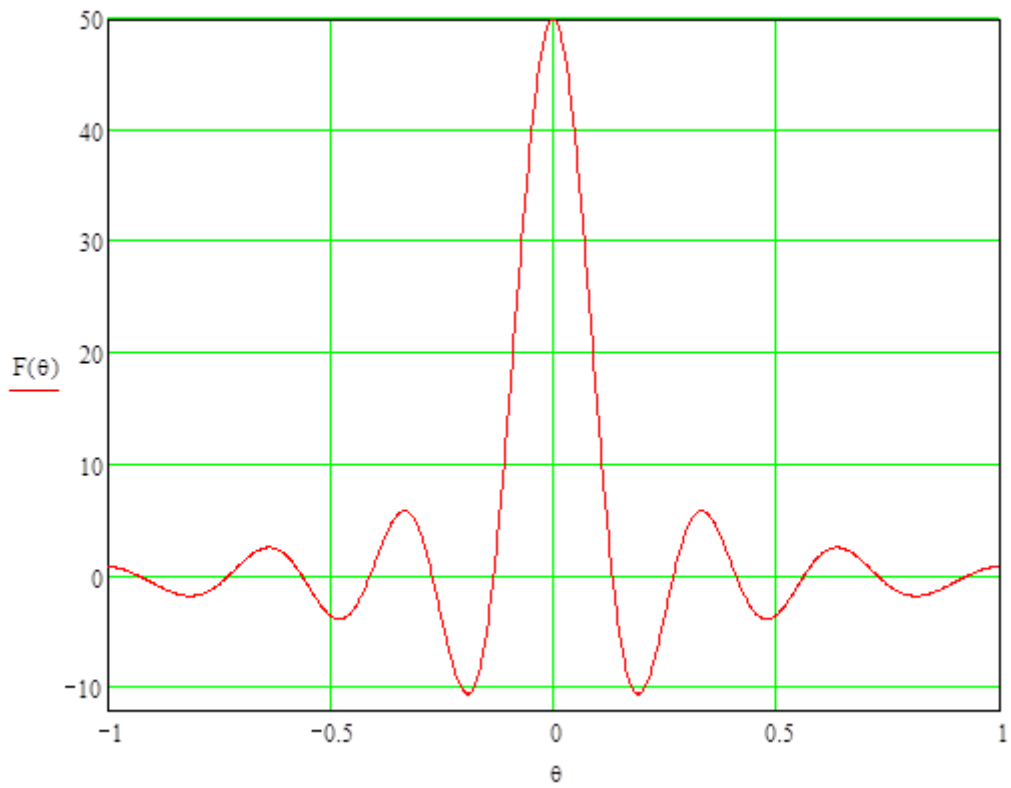


Рисунок 5 – Діаграма спрямованості хвилевідно-щілинної антени в декартовій системі координат на частоті 2 ГГц

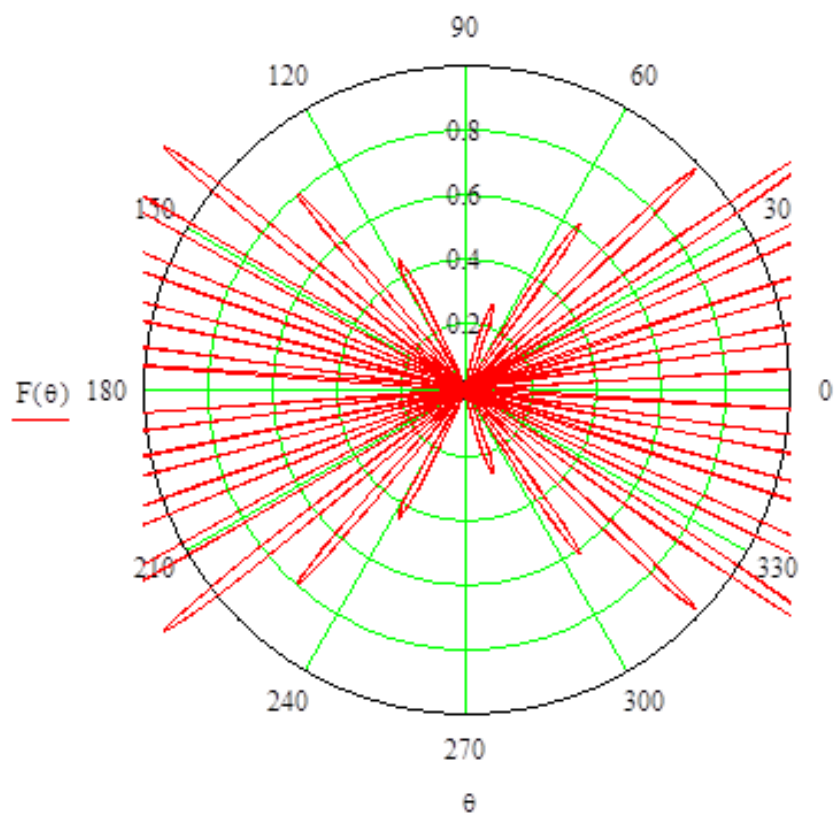


Рисунок 6 – Діаграма спрямованості хвилевідно-щілинної антени в полярній системі координат на частоті 4 ГГц

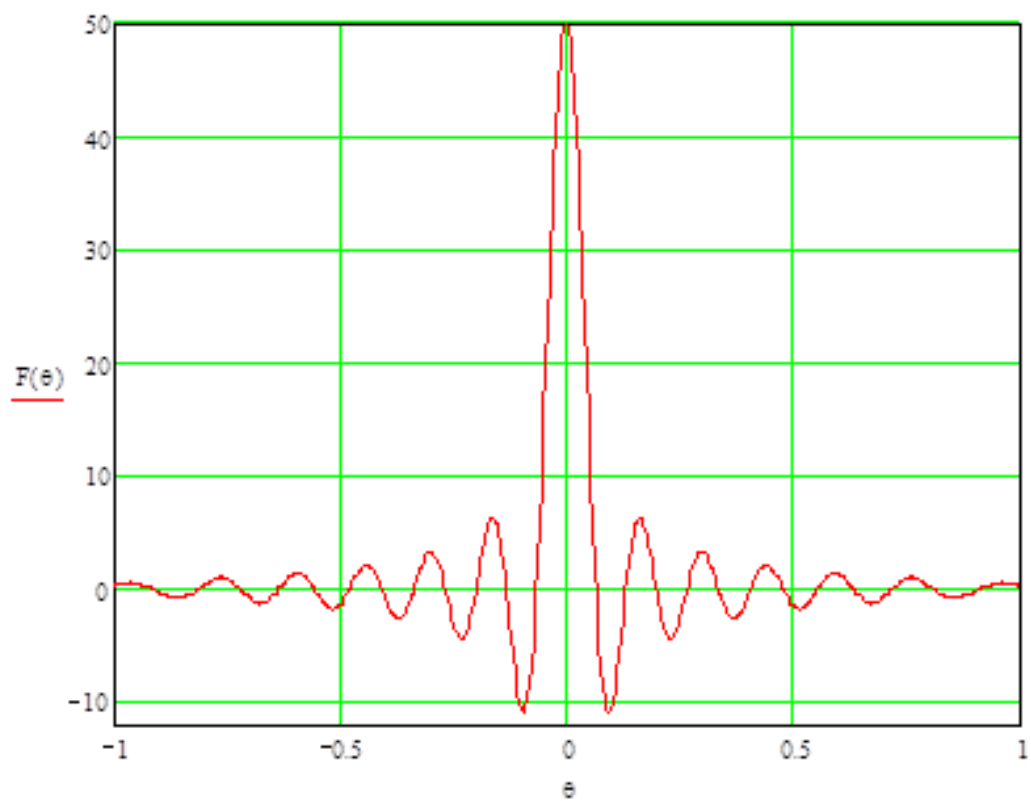


Рисунок 7 – Діаграма спрямованості хвилевідно-щілинної антени в декартовій системі координат на частоті 4 ГГц

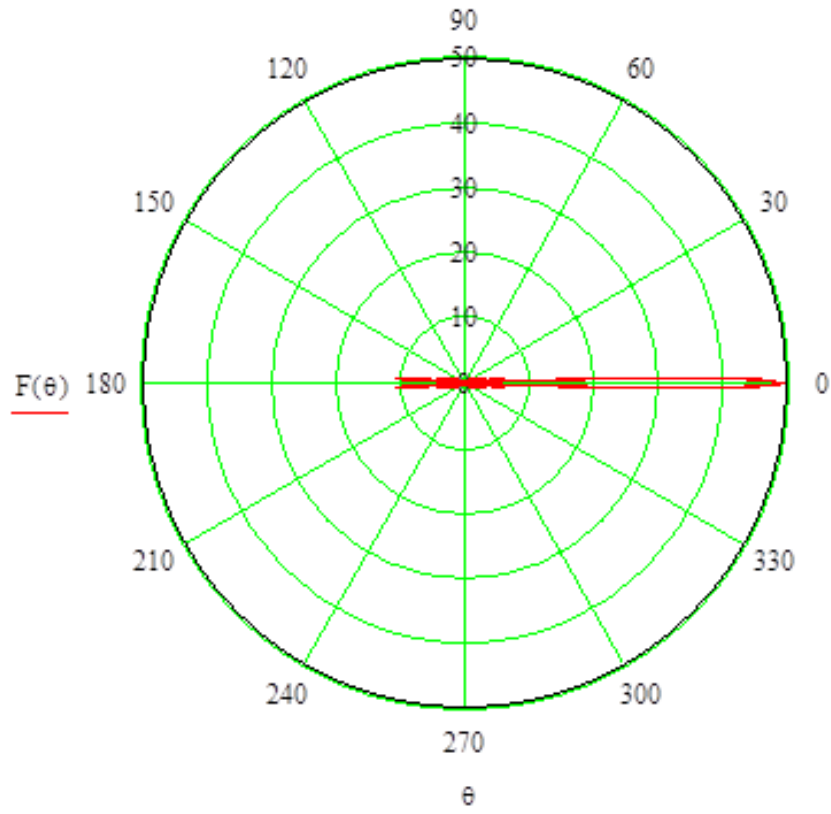


Рисунок 8 – Діаграма спрямованості хвилевідно-щілинної антени в полярній системі координат на частоті 6 ГГц



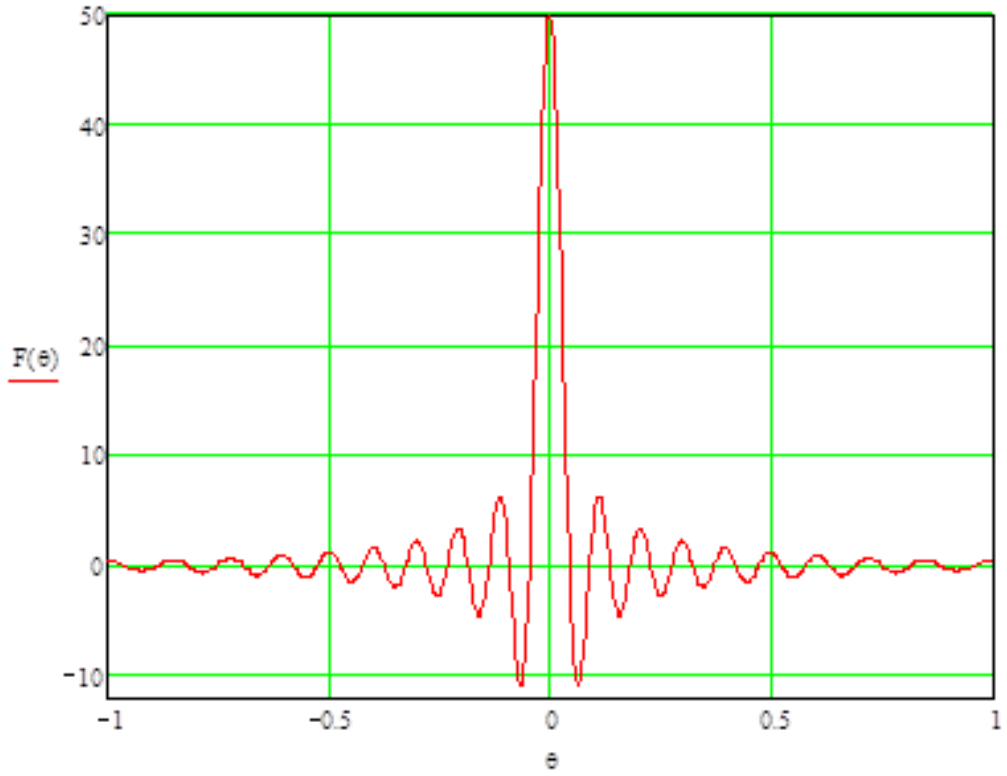


Рисунок 9 – Діаграма спрямованості хвилевідно-щілинної антени в декартовій системі координат на частоті 6 ГГц

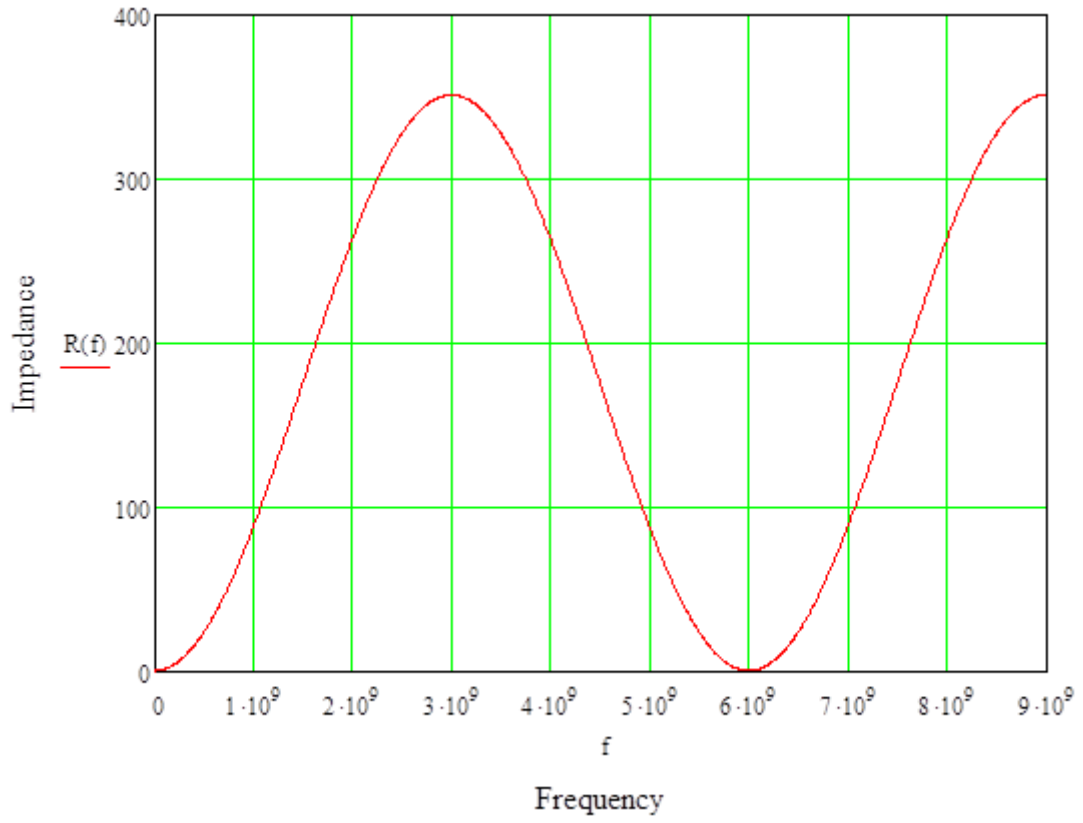


Рисунок 10 –Залежність вхідного опору антени