

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

Радіотехнічний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Радіотехнічних пристроїв та систем
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 621.372.81

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ С.Я. Жук
(підпис)

“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
за спеціалізацією Радіотехнічні інформаційні технології

на тему: Компактна широкосмугова смужкова антена із
симетричною схемою живлення як елемент антенної решітки

Виконав: студент VI курсу, групи РТ-71мп

Держукко Богдан Михайлович

(підпис)

Науковий керівник PhD, асистент, Сушко О.Ю.

(підпис)

Консультант ох. праці к.т.н., доц. Каштанов С.Ф.

(підпис)

Рецензент д-рин. о.мс Сій Степанів. М.М. професор. к.т.н.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Факультет

Радіотехнічний факультет

Кафедра

Радіотехнічних пристроїв та систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність
спеціалізація

172 Телекомунікації та радіотехніка
Радіотехнічні інформаційні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Жук С. Я.

(підпис)

«29» 10 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Дерунко Богдан Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Калібровка широкошарова смужкова антена із симетричною схемою живлення її елемент антенаї решітки

науковий керівник дисертації Сущко О.Ю., PhD, асистент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом по університету від «06» листопада 2018 р. №4093-С

2. Строк подання студентом дисертації 14 грудня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження Широкошарова смужкова антена з експоненційним розкритом

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Електронні характеристики узгодженки та випромінювання досліджуваної антени

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1) Побудувати модель антени; 2) Побудувати модель живлення; 3) Оптимізувати геометрію антени для отримання необхідних характеристик; 4) Виготовити макет антени; 5) Виміряти характеристики узгоджене в робочій смузі частот.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу широкоформатна графіка екранна презентація в кількості мікродарять екранів

7. Орієнтовний перелік публікацій Широкоформатна мікросхемка ва антена

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каштанов С.Ф., к.т.н., доцент		

9. Дата видачі завдання 26.09.2018 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Побудова моделі антени	28 лютого 2018 р.	
2	Оптимізація геометрії антени	19 листопада 2018 р.	
3	Побудова моделі живлення	23 листопада 2018 р.	
4	Виготовлення макету антени	30 листопада 2018 р.	
5	Вимірювання характеристик	10 грудня 2018 р.	

Студент

(підпис)

Б.М. Дерушко
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

О.Ю. Сучко
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Компактна широкопasmова смужкова антена із симетричною схемою живлення як елемент антенної решітки» складається з 8 розділів на 85 сторінках, 1 додаток, 58 формул та 70 ілюстрацій.

- **Ключові слова.** Широка смуга частот, мікросмужкова антена, антенна решітка.
- **Актуальність теми.** Розробка нових компактних дводіпазонних антен для мініатюрних радіоприймачів, компактних бездротових пристроїв, GPS навігаторів, автомобільних систем безпеки, тощо, допоможе вирішити низку технічних задач.
- **Мета.** Отримати прототип антени із заданими електродинамічними характеристиками згідно ТЗ.
- **Задачі дослідження.** Оптимізація геометрії антени для отримання потрібних ЕД характеристик виготовлення макету антени.
- **Об'єкт дослідження.** Широкопasmова смужкова антена з експоненційним розкритом.
- **Предмет дослідження.** Електродинамічні характеристики узгодження та випромінювання досліджуваної антени.
- **Методи дослідження.** Електродинамічне моделювання процесів за допомогою метода скінченних різниць в часовій області (*FDTD*).
- **Наукова новизна одержаних результатів.** Отримано універсальну широкопasmову систему живлення із вихідною компланарною мікросмужковою лінією.

ABSTRACT

The master's thesis on "Compact bandwidth antenna with symmetric power supply as an antenna array element" consists of 8 sections on 85 pages, 1 appendices, 58 formulas and 70 illustrations.

- **Keywords.** Wide bandwidth, microstrip antenna, antenna array.
- **Actuality of theme.** Developing new compact dual-band antennas for miniature radios, compact wireless devices, GPS navigators, automotive security systems, etc., will help solve a number of technical problems.
- **The purpose.** Obtain an antenna prototype with specified electrodynamic characteristics according to TK.
- **Research objectives.** Optimize the geometry of the antenna to obtain the required ED characteristics of the production of an antenna layout.
- **Object of study.** Broadband Antenna with Exponential Open.
- **Subject of study.** Electrodynamic characteristics of the alignment and radiation of the test antenna.
- **Research methods.** Electrodynamic modeling of processes using the method of finite difference in time domain (FDTD).
- **Scientific novelty of the obtained results.** A universal broadband system of living with the original coplanar microstrip line has been obtained.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, термінів.....	9
Вступ.....	10
1. Принципи побудови мікросмужкових антен та огляд існуючих аналогів.....	12
1.1 Типи мікросмужкових антен.....	12
1.1.1 Резонаторні мікросмужкові антени.....	13
1.1.2 Спиральні мікросмужкові антени.....	14
1.1.3 Мікросмужкова антена Вівальді.....	20
1.2 Системи живлення мікросмужкових антен.....	22
1.3 Вибір типу досліджуваної антени, принцип дії, конструктив.....	26
1.4 Системи живлення для фазованих антенних решіток.....	27
2. Технічна частина.....	35
2.1 Загальні положення методу скінченних різниць (<i>FDTD</i>) для розрахунку електромагнітних процесів і систем.....	35
2.2 Діелектричні підкладки, що використовуються для виготовлення мікросмужкових антен.....	38
2.3 Розрахунок досліджуваної антени.....	43
2.4 Розрахунок системи живлення досліджуваної антени.....	47
2.5 Результати моделювання.....	51
3. Результати експериментальних досліджень.....	56
3.1 Вимірювання характеристики узгодження S_{11} та характеристики передачі S_{21} системи живлення.....	56
3.2 Вимірювання характеристики узгодження S_{11} досліджуваної антени та системи живлення.....	60

4. Розрахунок антенної решітки	63
4.1 Антенна решітка 2x1.....	63
4.2 Антенна решітка 3x1.....	66
5. Розроблення стартап-проекту	71
5.1 Опис ідеї проекту.....	71
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	72
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	73
6. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	75
6.1 Визначення основних потенційно шкідливих та небезпечних факторів при виконанні науково-дослідницької роботи.....	75
6.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії.....	76
6.2.1 Електробезпека.....	76
6.2.1.1 Розрахунок електричної мережі на вимикаючу здатність.....	77
6.2.2 Відповідність параметрів робочого приміщення санітарним нормам.....	78
6.2.3 Освітлення робочих місць.....	79
6.2.4 Мікроклімат робочої зони.....	81
6.2.5 Розрахунок концентрації аерозолю свинцю в повітрі робочої зони.....	82
6.2.6 Місцева вентиляція на робочих місцях монтажників.....	84
6.2.7 Розрахунок ІЧ випромінювання на робочих місцях монтажників при проведенні процесу пайки.....	87
6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	88
6.3.1 Вимоги щодо організації ефективної роботи системи оповіщення виробничого персоналу у разі виникнення	

надзвичайної ситуації.....	88
6.3.2 Обов'язки та дії персоналу в надзвичайних ситуаціях.....	91
6.3.3 Пожежна безпека.....	92
7. Література.....	95
8. Висновки.....	97
Додаток А. Публікації по темі дисертації.....	98

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі

МСЛ – мікросмужкова лінія

ЩЛ – щілинна лінія

АР – антенна решітка

СЖ – система живлення

КМСЛ – копланарна мікросмужкова лінія

ВСТУП

В сучасних авіаційних та космічних радіотехнічних системах все більшого значення набувають широкосмугові антенні решітки. Вони, на відміну від вузькосмугових антен, здатні ефективно використовувати апертуру для роботи у широкому діапазоні частот. Завдяки цьому можна суттєво зменшити габарити і вагу випромінюючої системи, а також скористатися позитивними властивостями розповсюдження та розсіювання електромагнітних хвиль різних частотних діапазонів. Останнє дозволяє підвищити точність визначення координат і надійність роботи в умовах активних та пасивних завад у навігаційних та радарних бортових системах. Безперечно, актуальною задачею на сьогодні є розробка нових компактних двочастотних антен. Головним складовим елементом цих систем можуть бути мікросмужкові резонатори, які широко використовуються в сучасній науці і техніці. Головними перевагами мікросмужкових антен є легкість виготовлення, мала ціна і головне легкість і компактність конструкції, що є одним із важливих факторів в авіабудуванні.

У рамках даної дипломної роботи планується дослідити широкосмугову мікросмужкову антену, а також необхідну для її роботи систему живлення. Також передбачається розробка системи антенної решітки. Особливістю теорії мікросмужкової антени є складність розрахунку поля антени. В роботі був використаний сучасний математичний апарат для комп'ютерних розрахунків характеристик антени і були вирішені наступні задачі:

1. Огляд різних конструктивних особливостей побудови широкосмугових мікросмужкових антен, аналіз їх характеристик і вибір робочого прототипу;
2. Оптимізація параметрів мікросмужкових випромінювачів, розрахунок їх характеристик;
3. Розрахунок системи живлення широкосмугової мікросмужкової антени;
4. Створення антенної решітки, розрахунок її характеристик;

Також по отриманим результатам роботи було виготовлено експериментальні зразки розробленої антени, елементів живлення та перевірка їх характеристик.

1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МІКРОСМУЖКОВИХ АНТЕН ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ АНАЛОГІВ

1.1 Типи мікросмужкових антен

Поява мікросмужкових антен викликана потребою в легких, тонких і дешевих антенних пристроях, які можна розміщувати на ракетах і інших літальних апаратах, не порушуючи їх аеродинамічні якості, також їх ще називають друкованими антенами. В даний час створено і запатентовано значне число зразків мікросмужкових одноелементних антен і антенних решіток [1]. Є можливість створювати антени з лінійною та круговою поляризацією, а також двочастотні антени. Також мікросмужкові антени легко встановлюються на плоских поверхнях літальних апаратів. Будь-яка мікросмужкова антена являє собою лист діелектрика невеликої товщини з нанесеним з обох сторін, як правило, тонким мідним покриттям. На одній стороні виготовлені випромінюючий елемент, ланцюги живлення, керування та узгодження. Інша металева сторона антенної плати працює в якості екрану. Головними перевагами мікросмужкових антен є: малі маса, габарити і ціна, а також легкість об'єднання з мікрохвильовими інтегральними схемами та виготовлення за допомогою розвиненої технології фотолітографії. Вперше поняття мікросмужкового випромінювача було запропоноване Дешампсом в 1953 р.[2], а запатентоване у Франції на ім'я Гуттон і Байзіннот [2]. Однак, з тих пір пройшло ще 20 років, поки не була збудована перша така антена. Дослідження, що тривали впродовж 1970-х років, були прискорені вже отриманими діелектричними матеріалами з малим тангенсом кута втрат і прекрасними температурними і механічними властивостями, покращеною технологією фотолітографії і кращими теоретичними моделями. Перша

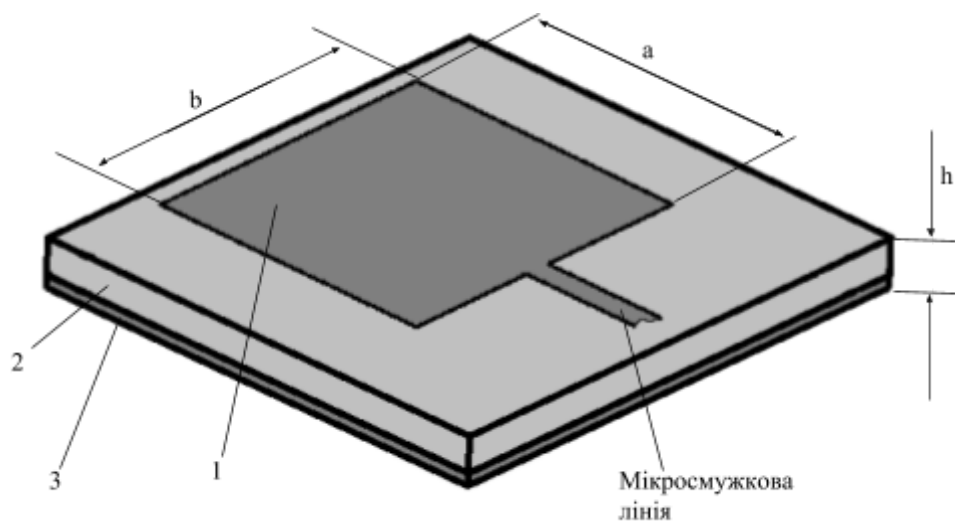
мікросмуужкова антена була розроблена Ховеллом і Мансоном [5]. З того часу почалося інтенсивне вивчення і розробка мікросмуужкових антен і систем, пов'язане з використанням їх численних переваг.

1.1.1 Резонаторні мікросмуужкові антени

Широке застосування знайшли друковані випромінювачі типу резонатора, побудовані на базі несиметричної мікросмуужкової лінії. Іншим типом мікросмуужкових антен в друкованому виконанні є вібратори різної конфігурації і щілини, прорізані в металевій стінці мікросмуужкової лінії передачі симетричного типу.

Відмінністю цих антен є плоскі стрічкові спіралі і криволінійні випромінювачі. Елементи випромінюючих структур можуть мати найрізноманітнішу геометричну форму: прямокутну, круглу, трикутну, еліптичну, кільцеву та ін.. Ці структури можуть працювати як в резонансному, так і в не резонансному режимах і можуть збуджуватися мікросмуужковою лінією, коаксіальним кабелем, за рахунок електромагнітного зв'язку і т.д. [3]. Приклад випромінювача типу резонатора наведено на рис.1.1.1.

Рис.1.1.1 – Друкована антена типу резонатора з лінійною поляризацією



Випромінювач складається з прямокутного смужкового провідника 1, розташованого на тонкому діелектричному шарі 2 з провідною підкладкою 3. Збудження випромінювача відбувається за рахунок плоскої лінії передачі. Для лінії передачі ця система є плоским, заповненим резонатором з втратами, які обумовлені випромінюванням. Розмір “а”, як правило є $\lambda_d / 2$, де λ_d - довжина хвилі в діелектрику. На краях резонатора складові поля, нормальні до провідної підкладці, знаходяться в протифазі. Складові поля, які є паралельними до провідної підкладки, складаючись в фазі, створюють поле випромінювання лінійної поляризації з напрямком максимального випромінювання по нормалі до площини підкладки. Розмір “b” випромінювача може бути різним і впливає на широкосмуговість антени.

1.1.2 Спіральні мікросмужкові антени

Серед різних типів широкосмугових мікросмужкових антен важливе місце займають різноманітні спіральні антени. Спіральні антени є слабо і середньо направленими широкосмуговими антенами еліптичної і кругової поляризації. Вони застосовуються в якості самостійних антен, збудників хвилеводно-рупорних антен еліптичної і кругової поляризації, елементів антенних решіток.

Спіральні антени – це антени поверхневих хвиль. По виду направителя (системи, що сповільнює) і способу забезпечення роботи в широкому діапазоні частот мікросмужкові спіральні антени відносяться до частотно-незалежних, зовнішній вигляд на рис. 1.1.2.1.

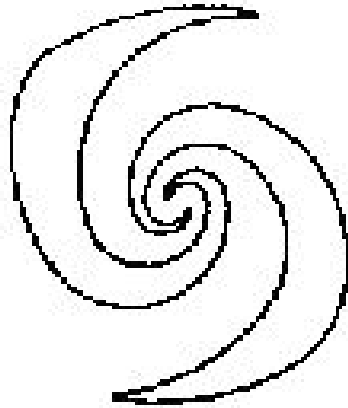


Рисунок 1.1.2.1 *Приклад мікросмушкової спіральної антени*

За кількістю заходів (гілок) і способу їх намотування спіральні антени можуть бути одно- і багатозахідні з одностороннім або двостороннім (зустрічним) намотуванням.

Однією з основних властивостей спіральних антен є їх здатність працювати в широкій смузі частот з коефіцієнтом перекриття від 1.5 до 10 і більше. Всі спіральні антени - це антени біжучої хвилі, але одна обставина сама по собі не зумовлює роботу спіральних антен в діапазоні частот з таким коефіцієнтом перекриття.

Робота однозахідних регулярних циліндричних спіральних антен і їх модифікацій в діапазоні частот можлива завдяки їх дисперсійним властивостям, внаслідок яких в широкому діапазоні частот фазова швидкість поля уздовж осі спіралі близька до швидкості світла, відображення від вільного кінця спіралі мало, довжина хвилі в проводі спіралі приблизно дорівнює довжині витка.

У багато західних циліндричних спіральних антенах робочий діапазон додатково розширюється внаслідок придушення в них найближчих нижчих і вищих типів хвиль, які деформують діаграму спрямованості основного типу.

Спіральні антени з односторонньою намоткою випромінюють поле з еліптичної, близькою до кругової, поляризацією. Напрямок обертання вектора поля відповідає напрямку намотування спіралі. Для отримання лінійної і керованої поляризації використовують спіральні антени з двостороннім (зустрічним) намотуванням рис.1.1.2.2.

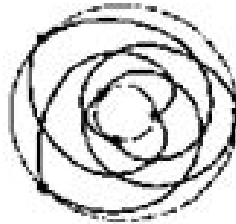


Рисунок 1.1.2.2 – Частотно-незалежна спіральна антена з двосторонньою (зустрічною) намоткою (тризахідна)

Форма частотно-незалежних плоских спіральних антен визначається тільки кутами. Кожній довжині хвилі в межах робочого діапазону відповідає випромінююча ділянка незмінної форми і постійних електричних розмірів. Тому ширина діаграми спрямованості і вхідного опору наближено залишаються постійними в досить широких діапазонах частот (10:1 ... 20:1).

Для отримання односпрямованого випромінювання з еліптичною поляризацією в менших діапазонах частот (2:1 ... 4:1) немає необхідності суворо витримувати форму антени відповідно до частотної незалежності. Якщо при переході від однієї довжини хвилі до іншої форма і електричні розміри випромінюючого елемента повторюються хоча б наближено, антена працює в діапазоні частот з меншою постійністю характеристик і параметрів. Слідуючи цьому, можна побудувати дуже широке, що не підкоряється точно принципам частотної незалежності сімейство антен у вигляді одно- або багатозахідних спіралей, навитих (за

різними законами намотування) на різних поверхнях обертання. Іноді такі антени називають квазічастотно-незалежними.

Спіральні антени дозволяють формувати односпрямовані діаграми спрямованості з шириною $2\theta_{0,5} \approx (25 \dots 180)^\circ$, тороїдальні з шириною $2\theta_{0,5} \approx (45 \dots 90)^\circ$ і воронкові з шириною $2\theta_{0,5} \approx (40 \dots 60)^\circ$. Поляризація випромінювання може бути еліптичною, близькою до кругової, круговою. У більшості випадків основними вимогами до спіральних антен є здатність працювати в широкому діапазоні частот з коефіцієнтом перекриття зазвичай від 1,5 до 10 і в окремих випадках більше забезпечення еліптичності, близькі до кругової, або кругової поляризації, а не стабільність характеристик і параметрів. Тому часто допускаються вельми значні зміни характеристик і параметрів в діапазоні частот: зміни ширини діаграми спрямованості в півтора-два рази, збільшення коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) в окремих точках діапазону до 1,5 ... 2. Вимоги до рівня бічних пелюсток і стабільності напрямку головного максимуму також бувають не жорсткими. Дуже часто допускається рівень бічних пелюсток, що досягає 30% по полю, і зміна напрямку головного максимуму до 10%.

Основним елементом мікросмушкових спіральних антен є виток провідного матеріалу довжиною, приблизно рівною λ (діаметр $\sim \lambda / \pi$). У переважній більшості випадків спіральні антени збуджуються коаксіальною лінією. Тому по частотному діапазону область їх застосування на довгих хвилях обмежена гранично допустимими габаритами, а на коротких - досяжною точністю виготовлення і технологічністю конструкції, високочастотною межею робочого діапазону коаксіальних кабелів і можливістю конструктивної реалізації потрібної форми переходу від коаксіального фідера до гілок спіральної структури.

Мікросмушкові спіральні антени з постійним кроком не є частотно-незалежними. У плоских спіральних антен зі збільшенням частоти діаграма спрямованості розширюється.

Плоскі спіральні антени мають мінімальні поздовжні габарити ($L \leq 0,25\lambda$ макс). Максимальні поперечні розміри цих антен складають $2a \approx (0,35 \dots 0,6) \lambda$ макс.

Ще один вид мікросмушкових спіральних антен це рівнокутна (логарифмічна) спіральна антена рис.1.1.2.3.

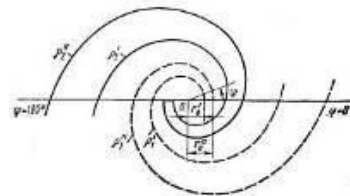


Рисунок 1.1.2.3 – Логарифмічна спіраль

Рівнокутна спіраль будується в полярних координатах по рівнянню

$$\rho = r_0 e^{a\varphi}$$

де r_0 - радіус-вектор на початку спіралі ($\varphi = 0$);

a - коефіцієнт, що визначає ступінь збільшення радіус-вектора зі збільшенням полярного кута φ .

Логарифмічна спіраль працює в режимі біжучих хвиль (внаслідок випромінювання струм згасає до кінця спіралі), і її вхідний опір $R_{ВХА} = 60 \dots 180$ Ом.

Типова щільна логарифмічна спіраль (рис. 1.1.2.4) має максимальну довжину витків 42,3 см, початковий радіус 0,51 см і коефіцієнт $a = 0,303$.



Рисунок 1.1.2.4 – *Щілинна плоска логарифмічна спіральна антена*

Антенa випромінює хвилі з круговою поляризацією в діапазоні $\lambda = 3...15$ см і КСХН < 2 при живленні спіралі від 50 Ом коаксіального кабелю.

Арифметична смужкова спіраль виконується у вигляді плоских металевих стрічок або щілин в металевому екрані (рис. 1.9). Рівняння цієї спіралі в полярних координатах

$$\rho = a \cdot \phi + b$$

де ρ - радіус-вектор, злічуваний від полюса O;

a - коефіцієнт, що характеризує приріст радіус-вектора на кожну одиницю збільшення полярного кута ϕ ;

b - початкове значення радіус вектора.

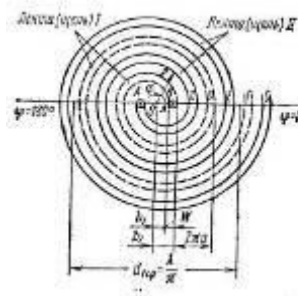


Рисунок 1.1.2.5 – *Арифметична спіраль*

Смужкові спіральні антени випромінюють з обох боків своєї осі. Щоб зробити антену односпрямованою, стрічкову спіраль поміщають на діелектричній пластині товщиною $\lambda_0/4$, іншу сторону якої

металізують. Якщо ж спіраль щілинна, то її вирізують на стінці металевого короба; тоді протилежна стінка короба грає роль екрана, що відбиває, а сам короб є резонатором. Щоб зменшити його глибину, короб заповнюють діелектриком.

1.1.3 Мікросмужкова антена Вівальді

Антена Вівальді це надширокосмуговий друкований випромінювач, побудований на основі розширення щілинної лінії. Робоча смуга такого випромінювача зазвичай перекриває частоти від 0,3..0,8 до 10..17 ГГц. Діаграма спрямованості таких антен є направленою в напрямку розширення щілинної лінії, коефіцієнт підсилення 4...10 дБі. Поляризація тільки лінійна[11].

Антена являє собою діелектричну підкладку, на одну сторону якої нанесений шар металізації в формі розкривного рупора, інша сторона пуста. Весь випромінювач Вівальді можна розділити на три зони, які мають певні функції в процесі перетворення і випромінювання сигналів:

- розкрив - зона, сформована металізацією, що виконує функцію випромінювання сигналу;

- перетворювач - зона, в якій незбалансована смужкова, мікросмужкова або коаксіальна лінія переходить в збалансовану щільову лінію, підключену до розкриву;

- резонатор - зона, розташована на початку щілинної лінії; дана зона розглядається окремо від двох інших зон, так як її основна функція - це узгодження електричних характеристик випромінювача і лінії живлення.

На рисунку 1.1.3.1 представлений вид антени Вівальді з нанесеними функціональними зонами [6].

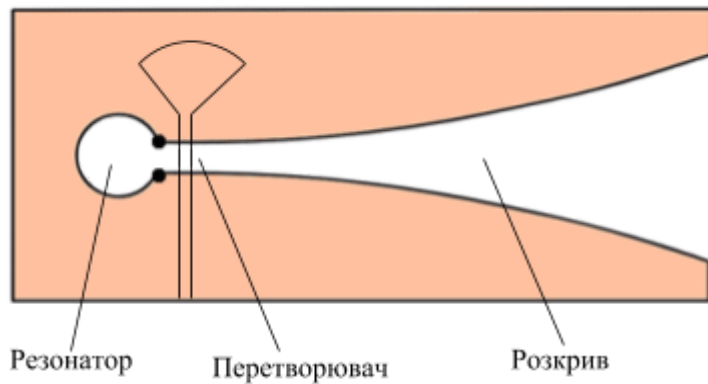


Рис.1.1.3.1. *Випромінювач Вівальді*

На практиці зустрічаються різні форми розкривів випромінювача Вівальді. Основними з них є розкриваючі, показані на рис. 1.1.3.2.

Конічний розкривши антени Вівальді грає роль перетворювача імпедансу апертури антени до значення, приблизно рівного імпедансу щілини, що лежить в основі розкриття (50 Ом). На практиці зустрічаються різні форми розкривів випромінювача Вівальді. Найкращі характеристики демонструє експонентний розкрив.

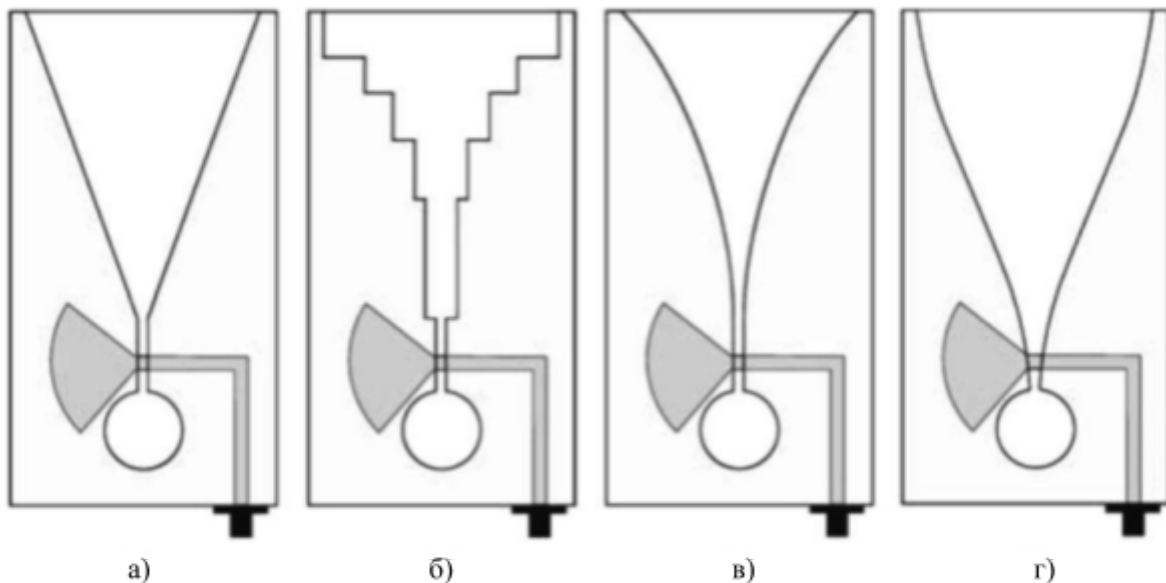


Рис.1.1.3.2. *Форми щільових розкривів антени Вівальді:*

а - лінійного; б - ступінчатого; в - експоненційного; г - клопфестена

Ділянки, які покриті металом, можуть виконуватися друкованим методом. Антени Вівальді мають симетруючий пристрій, інтегрований в антену, який дає можливість легко підключати її до стандартних радіочастотних інтерфейсів, таких як коаксіальний кабель або несиметрична лінія (наприклад, мікросмужкова лінія). Це суттєва перевага, оскільки зовнішні широкосмугові симетруючі пристрої можуть бути односпрямованими (наприклад, активні симетруючі пристрої) або можуть займати великий обсяг (наприклад, пасивні симетруючі пристрої), що додає зайву вагу всій системі. Крім того, інтегрування симетруючого пристрою в антену Вівальді забезпечує додатковий ступінь свободи, яка в кінцевому підсумку призводить до більш високої продуктивності в порівнянні з незалежною оптимізацією імпедансу до 50 Ом і підключенню його до окремого симетруючого пристрою [12].

1.2 Системи живлення мікросмужкових антен

В найпростішому випадку мікросмужкові антени збуджують за допомогою несиметричної мікросмужкової лінії. Перевагою такого методу живлення є простота виготовлення, відносно невеликі габарити, легкість компонування з електронними компонентами. До недоліків слід віднести: вузьку робочу смугу частот; малу вхідну потужність; паразитне випромінювання живлячих мікросмужкових ліній.

З метою зменшення випромінювання фідерних ліній і розширення робочої смуги частот використовують наступні способи живлення:

1) Живлення за допомогою коаксіального зонда (Рис. 1.2.1) [3]. В цьому випадку коаксіальна фідерна система відокремлена від мікросмужкового випромінювача за допомогою провідної площини. Це

дозволяє зменшити випромінювання фідерних ліній. Недоліком такої схеми є необхідність виготовлення зонду (не дуже технологічна операція). Крім того сам зонд характеризується індуктивністю, опір якої зростає із зростанням частоти.

2) Живлення за допомогою щілинної апертури (Рис. 1.2.2.) [3]. В цьому випадку використовують дві підкладки: на одній розміщують мікросмужкову лінію, інвертовану в просторі, на іншій власне мікросмужковий резонатор. Підкладки розділені провідною площиною, в якій витравлена щілинна апертура для зв'язку мікросмужкової лінії і резонатора. Виготовлення такої антени дещо простіше порівняно із попередньою. При цьому зберігається можливість незалежного підбору параметрів підкладки для мікросмужкової лінії і для випромінюючого смужкового резонатора. Слід відзначити, що щілинна апертура може випромінювати частину сигналу вниз (під антену), що дещо знижує коефіцієнт підсилення антени в цілому і погіршує рівень заднього випромінювання.

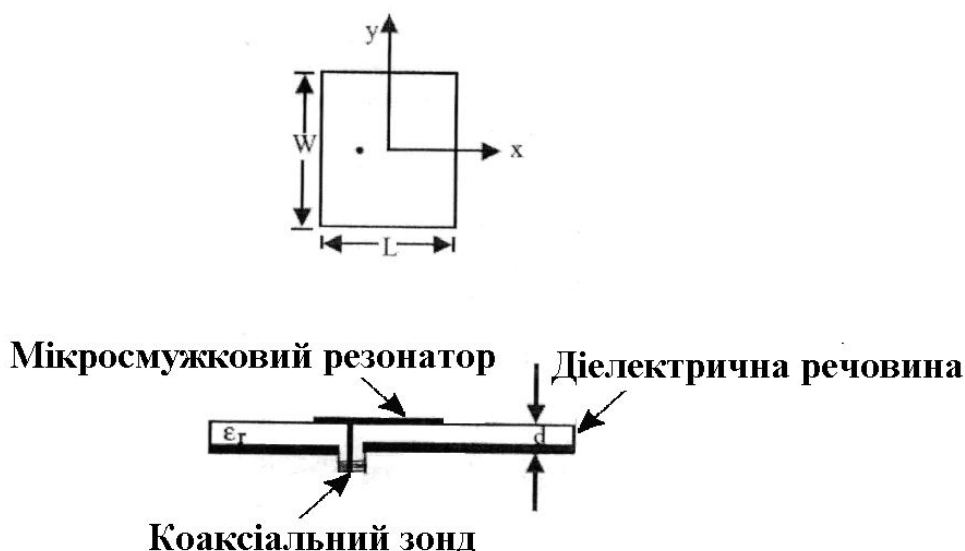


Рис. 1.2.1. Живлення мікросмужкового резонатора за допомогою зонда.

Площина заземлення з апертурою

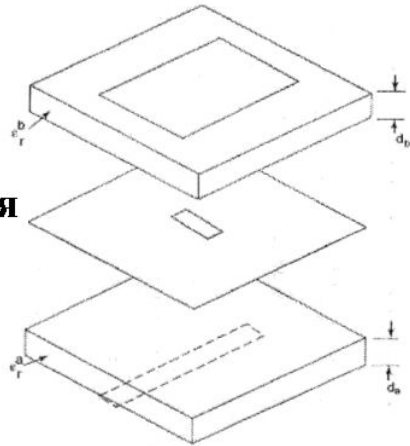


Рис. 1.2.2. Живлення мікросмушкового резонатора за допомогою щілинної апертури.

3) Живлення за допомогою ємнісного зв'язку мікросмушкової лінії і резонатора показане на рис. 1.2.3 [3]. В цьому випадку мікросмушкова лінія і резонатор знаходяться на різній відстані від екрану, що дозволяє збільшити робочу смугу частот резонатора, не збільшуючи при цьому паразитне випромінювання мікросмушкової лінії.

Найбільш радикальним методом розширення робочої смуги частоти є застосування дворезонаторних смужкових випромінювачів, коли смужки різної довжини розташовані одна над іншою. Нижній смужковий резонатор має меншу резонансну частоту, ніж верхній. Це призводить до створення зв'язаної дворезонансної системи, яка загалом має більш високу смугу частот. Приклад такої антени, із робочою смугою частот до 30% з живленням за допомогою щілинної апертури, показаний на Рис. 1.2.4 [3].

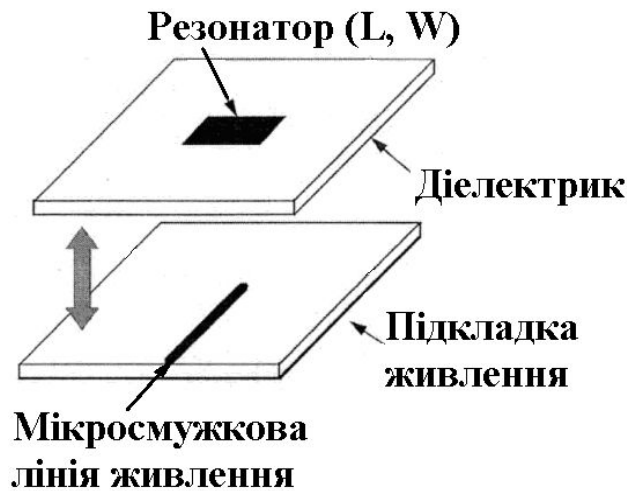


Рис. 1.2.3. Живлення мікросмушкового випромінювача за допомогою ємнісного зв'язу мікросмушкової лінії і резонатора



Рис. 1.2.4. Широкопосмуговий дворезонаторний смужковий випромінювач із живленням за допомогою щілинної апертури

4) Живлення за допомогою копланарної мікросмушкової лінії (далі КМСЛ) [3] найбільш часто використовується в якості лінії передачі НВЧ-діапазону. Копланарну лінію можна вважати різновидністю щільової лінії. Як і щільова, копланарна лінія не має нижніх частот відсічки, і в ній використовуються підложки з високою діелектричною проникністю, що забезпечує значне зменшення довжини хвилі в лінії та концентрації електромагнітного поля поблизу границі розділу діелектрик - повітря.

На копланарній лінії зручно розташувати зовнішні вбудовані елементи при розробці гібридних інтегральних схем. Магнітне поле на поверхні підкладки еліптично поліроване, що дозволяє створювати на лінії, нанесені на ферритову підложку, різні невзаємні пристрої. Заземлені пластини можна з'єднати металевою перемичкою, яка служить одночасно і екраном. Внаслідок концентрації поля біля підложки такий екран не вносить розбіжності, якщо він віддалений не менш ніж на відстань чотирьох відстаней між елементами копланарної лінії від підложки.

1.3 Вибір типу досліджуваної антени, принцип дії, конструктив

Провівши огляд літератури було прийнято рішення спроектувати антену яка мала б топологію, похідну від дипольної антени рис. 1.3.1, виконану методом фотолітографії, з широкою смугою робочих частот (2-6 ГГц). В результаті потрібно отримати антену, яка матиме невеликі розміри, підсилення на рівні 2-5 дБ,. Антена повинна бути максимально ефективною, тобто поряд з малим коефіцієнтом відбиття і малим КСХН в робочій смузі частот необхідно, також, досягти сталості діаграми спрямованості, низького рівня заднього випромінювання і бічних пелюсток.

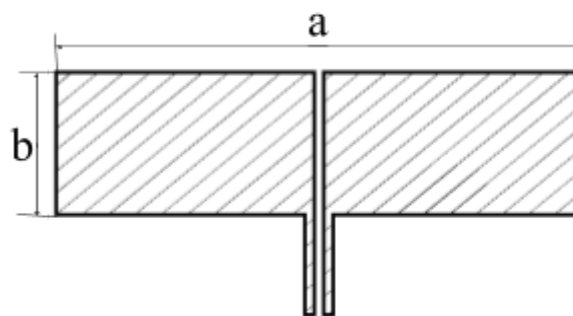


Рисунок 1.3.1

Антенa складається з діелектричної підкладки та нанесеної на неї з одного боку металізації. Металізована поверхня має форму, схожу до симетричного диполя. Для симетричного живлення даної антени використовується копланарна мікросмужкова лінія. При переході копланарної лінії в мікросмужковий диполь електричне поле починає поширюватися по всій апертурі антени і випромінюватися в простір. Діаграма спрямованості антени збігається з її осьовим напрямком, оскільки вектор напруженості електричного поля не змінює свого напрямку, поширюючись від живлення антени. Ширококутовість досягається за рахунок збільшення довжини (b) активних вібраторів, оскільки тоді збільшується ємнісний характер резонансної системи, зменшується індуктивний, в результаті це призводить до зменшення добротності антени в цілому.

1.4 Системи живлення для фазованих антенних решіток

Бажані характеристики антени можуть бути досягнуті з використанням одного мікросмужкового елемента, якщо він був правильно розрахований і виготовлений з дотриманням усіх технологічних етапів. Проте, як і у випадку з простими мікрохвильовими антенами, такі можливості як велике підсилення, сканування, або здатність управління можна досягти, коли дискретні випромінювачі скласти разом, створивши цим антенну решітку. Дискретні випромінюючі елементи у складі решітки можуть бути по різному розташовані, утворюючи лінійну, планарну або об'ємну решітку. Лінійні решітки складаються з елементів, розміщених на невеликій відстані один від одного вздовж прямої лінії. Планарна решітка має елементи, що розподілені рівномірно на площині, а об'ємні – розподіл

елементів в трьох вимірах. На практиці, тип решітки вибирають в залежності від майбутнього її застосування.

Використання фазованих антенних решіток (ФАР) дозволяє істотно підвищити ефективність сучасних бортових і наземних радіосистем за рахунок здійснення швидкого безінерційного огляду простору шляхом сканування променя антенної решітки електричними методами (електричне сканування); збільшення коефіцієнта підсилення антени; формування діаграми спрямованості з необхідними шириною і рівнем бічних пелюстків шляхом створення відповідного амплітудно-фазового розподілу по розкриву решітки [5]. Метод збудження елементів випромінювання є основним і важливим фактором, який потрібно враховувати, адже від нього в значній мірі залежить реалізація необхідного розподілу.

Існують два методи живлення мікросмужкових випромінювачів у складі решіток: паралельне і послідовне живлення, які відрізняються між собою швидше геометрично, аніж еквівалентними схемами. Паралельне живлення має один вхідний порт, який розділяється на окремі лінії живлення, що закінчуються вихідними портами в паралельному вигляді. Кожна з цих ліній живлення закінчується окремим випромінюючим елементом. Другий тип системи живлення, послідовне живлення, складається з неперервної передавальної лінії, від якої енергія маленькими порціями послідовно передається в окремі елементи, що розміщені вздовж лінії різними способами, такими як близьке з'єднання, пряме з'єднання, зондове з'єднання, або апертурне з'єднання. Послідовне живлення створює решітку біжучої хвилі, якщо на кінці лінії живлення розміщено необхідне навантаження, або резонансну решітку, якщо кінець лінії відкритий або короткозамкнений. Обидва типи живлення можуть бути

реалізовані або разом із випромінюючим елементом або на окремій діелектричній підкладці (в окремому шарі передавальної лінії). Системи живлення, в основному, мають певні рівні небажаного випромінювання та втрати, які потрібно уважно контролювати, аби мінімізувати негативний вплив на результати роботи решітки. До цих характеристик відносять провідникові і діелектричні втрати, поверхневі втрати хвилі, і втрати на випромінювання, спричинене різними неоднорідностями, такими як повороти, з'єднання і переходи. Всі ці втрати складаються і знижують результуюче значення коефіцієнту підсилення мікросмужкової решітки.

Основна конструкція одновимірного паралельного живлення складається з розгалуженої схеми з двоканальних дільників потужності, як показано на рисунку 1.4.1. Еквіамплітудне живлення – це найбільш широко вживаний тип паралельного живлення. В цьому випадку для формування відповідного апертурного амплітудно-фазового розподілу потужність однаково розподіляється в кожному з'єднанні; проте, можуть бути вибрані різні співвідношення потужності для поступового зменшення амплітуди вздовж решітки. Якщо відстані від вхідних портів до кожного випромінюючого елемента однакові, то положення головного пелюстка діаграми спрямованості незалежить від частоти тобто живлення є широкосмуговим. При під'єднанні до кінців кожної лінії відповідних фазозсувачів можна реалізувати ФАР, де буде відбуватись керування напрямком головного випромінювання. Описана схема ФАР потребує різної напруги керування для кожного фазозсувача. Додатковим недоліком цього типу живлення є відносно велика довжина передавальних ліній між випромінюючими елементами і вхідними портами, що може призвести до неприйнятних втрат і як наслідок до зниження коефіцієнту корисної дії (ККД) ФАР [5].

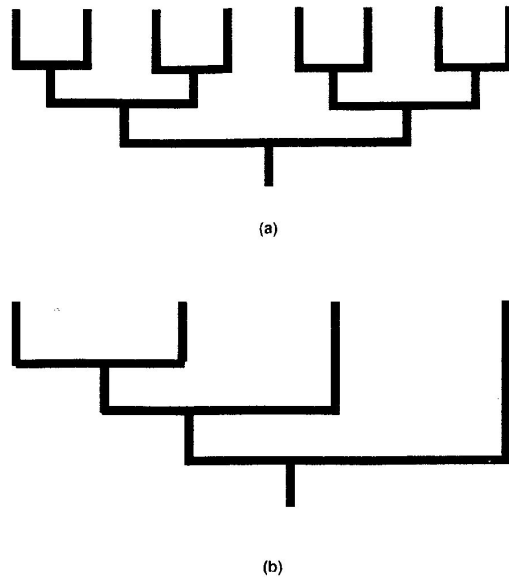


Рис.1.4.1. Основна одновимірна паралельна схема живлення
 а) симетрична конфігурація; б) асиметрична конфігурація

При проектуванні ФАР відповідно до рис. 1.4.1. усі випромінюючі елементи однаково під'єднують до лінії живлення за допомогою відрізків ліній, елементів зв'язку або чверть хвильових трансформаторів. Для симетричної сітки живлення кількість випромінюючих елементів дорівнює 2^n , де n – цілі числа. В іншому випадку буде використовуватися несиметрична лінія живлення, як показано на рис 1.4.1. б). Симетрія схеми живлення дозволяє використовувати ідентичні ділянки потужності для забезпечення необхідного апертурного розподілу, що призводить до зменшення необхідної кількості різних по геометрії ділянок потужності. На практиці, найбільш широко використовуються так звані ділянки потужності, побудовані по типу Т-з'єднання (можливо із модифікованою геометрією). Чвертьхвильові трансформатори в основному використовуються для узгодження хвильових опорів вздовж лінії.

Одновимірна схема паралельного живлення може бути розширена до двовимірної паралельної схеми, яка показана на рис. 1.4.2. Головна

конструкція підрешітки може розширятися в обидві сторони до більших решіток з кількістю елементів 2^n на сторону для досягнення симетрії конструкції. Якщо число елементів на сторону є непарним, то симетрія втрачається. В такому випадку треба використовувати різні подільники потужності для забезпечення необхідного апертурного розподілу. Сумарні втрати антенної решітки складаються з втрат в діелектрику, втрат в металі і втрат в системі живлення.

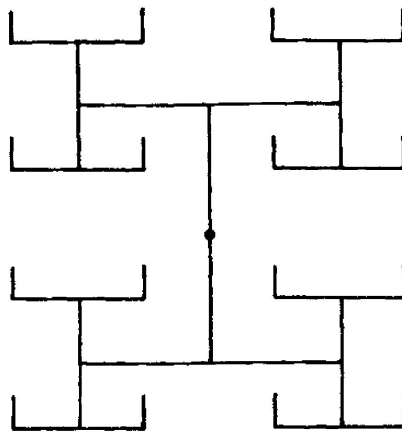


Рис.1.4.2. Двовірна паралельна схема живлення.

Наведемо переваги та недоліки паралельної схеми живлення:

Переваги:

- Працює в широкій смузі частот: $\Delta f / f > 5\%$;
- На фазозсувач потрапляє невелика відгалужена потужність;
- Фазові помилки і втрати в фазозсувачах не накопичуються.

Недоліки:

- Всі керуючі напруги для фазозсувачів різні;
- Для великої кількості елементів лінія живлення стає довгою, що призводить до збільшення втрат;
- Схема має великі габарити.

Типові мікросмушкові решітки з послідовним живленням показані на рис. 1.4.3. для двох типів розташування випромінюючих елементів: повернуті зміщені і незміщені [4]. В незміщених решітках на рис. 1.4.3. а) для напрямку головної пелюстки діаграми спрямованості вздовж нормалі до площини підкладки відстань між елементами $\epsilon \lambda_g$. У випадку зміщеної решітки (як показано на рисунку 1.4.3. б)) ϵ зсув фаз рівний 180° випромінюючого поля між сусідніми елементами завдяки механізму з'єднання. В результаті, відстань між елементами $\lambda_g/2$ призведе до нормального напрямку випромінювання [13]. Отже, зміщена решітка може забезпечити більші кути сканування без виробництва додаткових елементів.

Як видно з рис. 1.4.3, кількість ліній живлення менша ніж в паралельній схемі, яку застосовують лише, коли потрібно максимізувати повну ефективність решітки. Недоліками цього типу живлення є вузька смуга робочих частот і наявність паразитного частотного сканування, завдяки фазовому зсуву в лінії послідовної конструкції. Проте, при відповідних коректуваннях параметрів решітки, зсув променя може бути зведений до мінімуму.

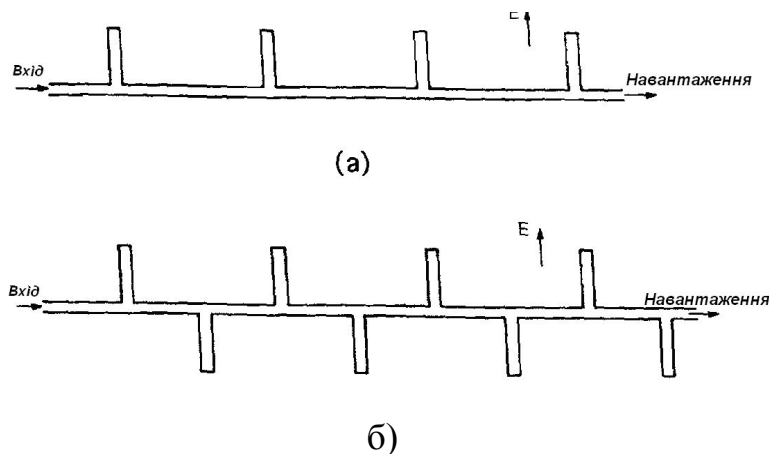


Рис. 1.4.3. Одновимірне послідовне живлення антенної решітки
а) незміщена конструкція; б) зміщена конструкція

Послідовне живлення поділяється на схему резонансного типу і схему біжучої хвилі. Резонансна схема закінчується або холостим ходом або коротким замиканням і відстанню від кінця до останнього випромінюючого елемента в пів або чверть довжини хвилі, відповідно. Отже, навантаження завжди являється холостим ходом в останньому елементі. Відстань між елементами може бути або λ_g або $\lambda_g/2$ в залежності від розташування елементів (незміщений або зміщений тип). Смуга частот резонансних схем, зазвичай, є вузькою.

Послідовне живлення антенної решітки в режимі біжучої хвилі досягається узгодженням навантаження на кінці лінії, для поглинання залишкової енергії від останнього елемента. Для зменшення омичних втрат решітка може проектуватись так, що останній випромінюючий елемент буде виконувати роль навантаження, як показано на рисунку 1.4.4. Як і для випадку резонансної решітки, випромінюючі елементи вздовж лінії живлення можуть бути незміщеного і зміщеного типу і з відстанню один від одного λ_g або $\lambda_g/2$ для широкого бічного пелюстка. При використанні біжучої хвилі максимум діаграми спрямованості буде зміщуватись при зміні частоти.

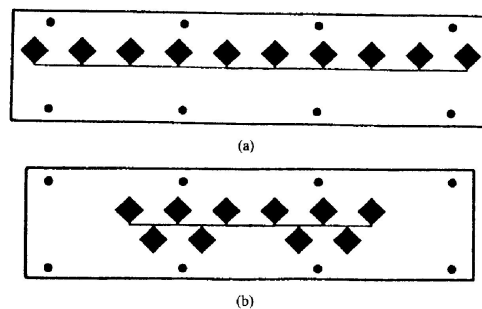


Рис. 1.4.4. Лінійна решітка біжучої хвилі з живленням квадратних резонаторів:

а) конструкція незміщеного типу; б) конструкція зміщеного типу

Наведемо переваги та недоліки послідовної схеми живлення:

Переваги:

- Компактність;
- на фазозсувач потрапляє невелика відгалужена потужність;
- Фазові помилки і втрати в фазозсувачах не накопичуються;
- Простота виготовлення.

Недоліки:

- Всі керуючі напруги для фазозсувачів різні;
- Працює в невеликій смузі частот: $\Delta f / f < 5\%$;
- Потребує багато різних напрямлених відгалужувачів потужності.

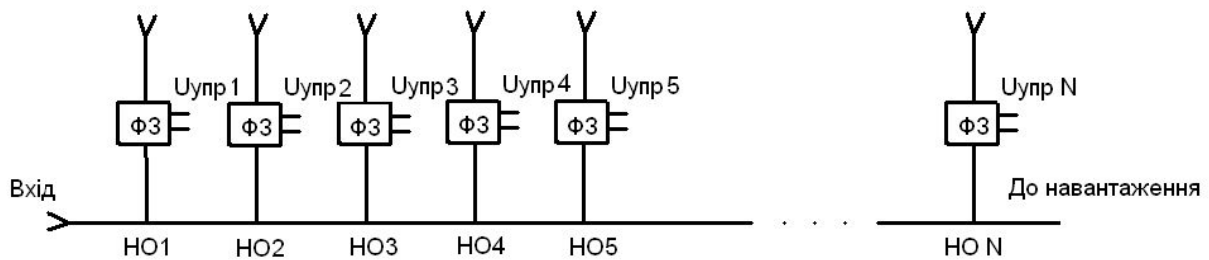


Рис.1.4.5. Загальна конструкція послідовного живлення незміщеного типу

2. ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Загальні положення методу скінченних різниць в часовій області (FDTD) для електродинамічного моделювання процесів і систем

Метод скінченних різниць у часовій області (FDTD) використовується для знаходження розв'язку системи рівнянь Максвелла у часовій області. Незважаючи на складність цих рівнянь і наявність у них часткових похідних, їх можна перетворити у форму, зручну для чисельних розрахунків.

Для ізотропного середовища за умови відсутності магнітних струмів основні рівняння Максвелла можуть бути записані в наступній формі:

$$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} + \nabla \times \bar{E} = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} - \nabla \times \bar{H} = -\bar{J}, \quad (2.2)$$

$$\bar{B} = \epsilon \bar{H}, \quad (2.3)$$

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E}. \quad (2.4)$$

де вектор електричного струму \bar{J} , діелектрична ϵ і магнітна μ проникності середовища вважаються відомими функціями простору і часу, а ∇ - векторний диференціальний оператор. У декартовій системі координат маємо:

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

Слід зазначити, що для будь-якого вектору справедливе таке співвідношення:

$$\nabla \times \vec{F} \equiv \text{rot} \vec{F} = \begin{vmatrix} \vec{x}_0 & \vec{y}_0 & \vec{z}_0 \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} = \vec{x}_0 \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) + \vec{y}_0 \left(-\frac{\partial F_z}{\partial x} + \frac{\partial F_x}{\partial z} \right) + \vec{z}_0 \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right)$$

де x_0, y_0, z_0 - одиничні вектори вздовж координатних осей. Тоді із (2.1)

та (2.2) для декартової системи координат отримаємо:

$$-\frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \quad (2.5)$$

$$-\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial D_x}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - J_x, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial D_y}{\partial t} = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - J_y, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial D_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - J_z. \quad (2.10)$$

Дискретизуємо простір задачі і час. Визначимо точку простору як:

$$(i, j, k) = (i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y, k \cdot \Delta z),$$

а для будь-якої функції простору і часу приймемо такий запис:

$$F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z; n\Delta t) = F^n(i, j, k).$$

Застосувавши апроксимацію у вигляді скінченних різниць до рівнянь (2.5) і (2.8) можемо отримати:

$$\frac{B_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - B_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta t} = \frac{E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k+1) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta z} -$$

$$-\frac{E_z^n(i, j+1, k+\frac{1}{2})-E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta y}, \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{D_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k)-D_x^{n-1}(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta t} &= \frac{H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)-H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k)}{\Delta z} \\ - \frac{H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})-H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2})}{\Delta z} &- J_x^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k). \end{aligned} \quad (2.12)$$

Вирази, що відповідають рівнянням (2.6), (2.9) і (2.7), (2.10) виходять аналогічно. При цьому значення компонентів поля на кожному кроці знаходяться за значеннями на попередніх кроках. Саме такий ітераційний процес покладений в основу розрахунку методом FDTD. На мал. 2.1.1 показаний куб простору з компонентами E і H на кінцях, що ілюструє зв'язок компонентів поля в рівняннях Максвелла, представлених у вигляді скінченних різниць. Відзначимо, що останні містять звичайні операції додавання/віднімання і множення/ділення, які можна елементарно реалізувати на комп'ютері. Для проведення розрахунків потрібно розбити простір задачі на елементарні осередки й встановити початкові значення для всіх компонентів поля, що визначаються умовами збудження.

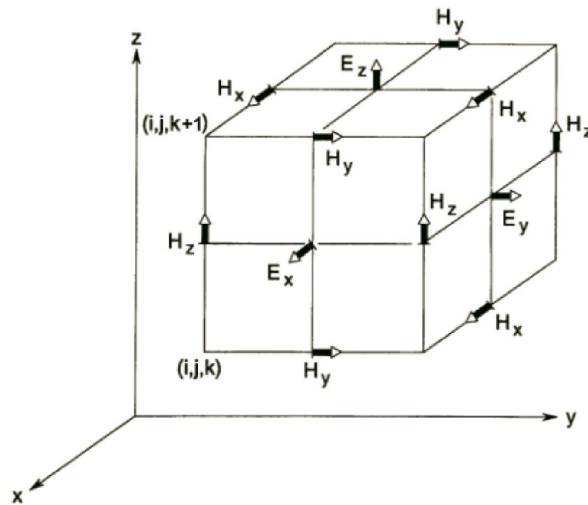


Рис. 2.1.1. Компоненти поля в кубічному просторі

Розмір просторової сітки повинний бути таким, щоб поблизу одного елемента сітки електромагнітне поле не мало значних скачків. Це означає, що для одержання адекватних результатів лінійні розміри сітки повинні складати частки довжини хвилі. Для одержання стійкості результатів обчислень необхідно задовольняти співвідношенню між просторовим збільшенням і тимчасовим приростом Δt . У випадку простору задачі з непостійними ϵ і μ , точний критерій стабільності одержати непросто. Для постійних ϵ і μ , стабільні обчислення вимагають

$$\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} > c\Delta t = \frac{\Delta t}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.13)$$

де c – швидкість світла в середовищі. Якщо c_{max} є максимальною швидкістю поширення світла в даній області задачі, потрібно вибирати:

$$\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} > c_{max}\Delta t \quad (2.14)$$

Ця необхідність вводить обмеження на Δt для вибраних Δx , Δy і Δz . Приймаючи, для прикладу, $c_{max} = c_0 = 3 \cdot 10^8$ м/с і $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10$ мм із (2.14) отримуємо наступне обмеження на крок Δt .

$$\Delta t < \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}{c_{max}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-2} \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \approx 6 \cdot 10^{-11} \text{ с} = 60 \text{ пс}$$

Це означає, що часовий процес, який триває 1 мсек, потребує 17 тис. кроків.

2.2 Діелектричні підкладки, що використовуються для виготовлення мікросмушкових антен

Матеріал діелектричної підкладки відіграє важливу роль в проектуванні мікросмушкових антен, виробництві і подальшому їх

використанні. Матеріал, що може здаватися ідеальним з точки зору проектування, не завжди може відповідати кінцевим вимогам продукту. Дуже важливо мати здатність виміряти і контролювати критичні властивості матеріалу, особливо діелектричну проникність і фактори, що впливають на втрати. Цим займаються вчені багатьох інститутів світу і на сьогоднішній день нові типи діелектричних підкладок, а особливо спеціальні підкладки, стають все більш доступними і часто можуть запропонувати істотні переваги в проектуванні і виробництві мікросмужкових антен.

Ми знаємо, що випромінювання мікросмужкової лінії, структура якої подібна до структури мікросмужкової антени, може бути суттєво зменшене, якщо використовувати тонку речовину з високою відносною діелектричною проникністю. З іншої сторони, випромінювання мікросмужкової антени є необхідною її властивістю. Тому, в мікросмужкових антенах використовуються діелектричні підкладки з низькою відносною діелектричною проникністю.

Вибір відповідної підкладки для мікросмужкової антени потрібно робити на самому початковому етапі розробки системи. Характеристики підкладки повинні повністю задовольняти поставленим задачам проекту і не змінювати їх під впливом зовнішніх факторів на протязі усього терміну служби. Виділяють три основні характеристики підкладки: комплексна діелектрична проникність, абсорбція води і міцність приєднання металічної фольги (провідника).

Комплексна діелектрична проникність має дві компоненти, а саме відносну проникність (діелектричну константу) і втрати (значення тангенсу кута втрат), вони є критичними для коефіцієнту корисної дії мікросмужкової антени. Вони не є фіксованими значеннями, швидше,

вони є функціями окремих факторів в складі підкладки, процесів використання антени.

В більшості випадків низька діелектрична проникність є бажаною для збільшення ефективності випромінювання та розширення робочої смуги частот. Пінні матеріали принципово можуть мати дуже низьку відносну проникність, близьку до одиниці. Тим не менш їх недоліками є погана механічна міцність та поганим опором до дії на підкладку тиску. Якщо випромінюючі елементи живляться мікросмужковою лінією на такій же самій підкладці, то збільшення значення діелектричної проникності необхідне для коректної роботи системи.

Втрати в діелектрику – це міра кількості електричної енергії, що витрачена на нагрівання діелектрика, і частково пояснює енергетичні втрати в пасивних пристроях таких як лінії передачі або мікросмужкових антенах. Втрати характеризують тангенсом кута втрат.

Поглинання вологи є неприпустимим процесом, тому що волога негативно впливає на електричні властивості. Природні умови можуть призвести до зменшення опору і потрапляння води до пристрою. Вода також є причиною корозії провідникових доріжок і руйнування зв'язків між провідником і підкладкою.

Потрапляння вологи може виникнути через присутність пор або мікро отворів в підкладці. Багато полімерів з полярними групами мають схильність до намокання через хімічний зв'язок. Молекулярні особливості, як наприклад з'єднання хлоридних груп або бромідних груп є предметами гідролізу, поглинена вологість хімічно реагує з полімером і змінює його характеристики. Тому антени з такими підкладками слід добре герметизувати, для уникнення потрапляння вологи всередину.

Велика кількість композитних матеріалів з різними системами полімерів можуть бути застосовані як підкладки для мікросмужкових антен. Список цих матеріалів, з основними їх характеристиками, показаний в таблиці 1 [10].

Колонка «частота», показує на якій частоті виконувались виміри відносної питомої провідності і коефіцієнта втрат. Колонка ϵ показує значення або ряд можливих значень відносної діелектричної провідності. $\tan\delta$ – значення коефіцієнта втрат. Абсорбція води – це характерні значення всмоктування води в міліграмах для квадратного зразка з довжиною сторони 51 мм, без металеві фолги, що був занурений протягом 24 годин в дистильовану воду при температурі $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

Таблиця. 2.2.1

Назва підкладки	Частота	ϵ	$\tan\delta$	Абсорбція води
Не плетене скло (політетрафторетилен)	1 МГц	2.15-2.35	0.001	1
	10 ГГц	2.15-2.35	0.001	1
Плетене скло (політетрафторетилен)	1 МГц	2.5	0.002	1
	10 ГГц	2.4-2.6	0.002	1
Політетрафторетилен	10 ГГц	2.1	0.0005	0.2
Керамічний політетрафторетилен	10 ГГц	6	0.002	-
Полістирен	10 ГГц	2.5	0.002	-
Скляний полістирен	1 МГц	2.6	0.002	-
Політерсульфон	1 ГГц	3.4	0.008	24
Duroid 5880	1 ГГц	2.2	0.0004	
Duroid 6002	10 ГГц	2.2±0.02	0.0009	-
	10 ГГц	2.94±0.04	0.0012	0.13

Duroid 6006	10 ГГц	6.15± 0.15	0.0027	0.05
Duroid 6010.2LM	10 ГГц	10.2±0.25	0.0023	0.05
Duroid 6202	10 ГГц	2.94±0.04	0.0015	0.1
Duroid 6202 PR	10 ГГц	3.00±0.04	0.002	-
Флан 2.8	10 ГГц	2.8±0.1	0.0015	-
Флан 3.8	10 ГГц	3.8±0.1	0.0012	-
Флан 5.0	10 ГГц	5.0±0.2	0.0015	-
Флан 7.2	10 ГГц	7.2±0.3	0.0015	-
Флан 10.0	10 ГГц	10.0±0.5	0.0015	-
Флан 16.0	10 ГГц	16.0±0.8	0.0015	-
ТММ 3	10 ГГц	3.27±0.032	0.002	-
ТММ 4	10 ГГц	4.5±0.045	0.002	-
ТММ 6	10 ГГц	6.0±0.08	0.0023	-
ТММ 10	10 ГГц	9.2±0.23	0.0022	-
ТММ 10i	10 ГГц	9.8±0.245	0.002	-
Склотекстоліт FR4	5ГГц	4.5	0.04	1.9

Для подальших досліджень обрано матеріал склотекстоліт FR4, що є самим масовим і доступним матеріалом для виготовлення друкованих плат і достатнім для вимог роботи мікросмужкових антен. Матеріал FR4 є композитом із скловолокна та епоксидної смоли. Характеристики матеріалу наведено в таблиці 2.2.1.

2.3 Розрахунок досліджуваної антени

Досліджувана антена складається із комбінації експоненційного розширення компланарної мікросмушкової лінії та двох напів диполів прямокутної форми. Для заданої антени потрібно забезпечити робочу смугу діапазоні частот 2-8 ГГц. Значення діелектричної проникності підкладки $\varepsilon = 4$.

Якщо розглянути досліджувану антену як коливальну систему [7], то її можна представити, як еквівалент індуктивності та ємності, які розподілені майже рівномірно по всій довжині антени. Резонансна частота вібратора визначається значеннями ємності та індуктивності, що залежать від його геометричних розмірів. Якість антени в основному визначається співвідношенням L/C . При малому відношенні маємо широкополосний контур з менш вираженим резонансом. Таким чином ширина смуги пропускання антени визначається відношенням L/C , яке в свою чергу залежить від відношення довжини хвилі до діаметра провідника у випадку дипольної антени - λ/d . На Рис. 2.3.1 наведено коефіцієнт укорочення півхвильового вібратора в залежності від відношення λ/d .

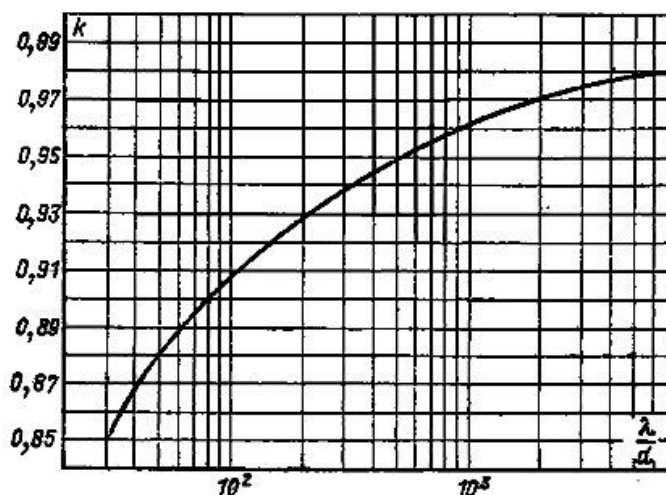


Рис. 2.3.1 Коефіцієнт укорочення

Ширина досліджуваної антени розраховується по найнижчій частоті - 2ГГц:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 10^9} = 0.15 \text{ м} = 150 \text{ мм}$$

Довжина півхвилі:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{150}{2} = 75 \text{ мм}$$

Візьмемо з діаграми на Рис. 2.3.1 найменший коефіцієнт укорочення ($k=0.85$), для досягнення найбільшої широкосмуговості антени. Відповідно співвідношення λ/d при такому коефіцієнті має значення 30.

Оскільки прямих формул для розрахунку геометричних розмірів мікросмужкової антени вибраної топології не має, виведемо формулу, що пов'язує площу випромінювання, або апертуру, мікросмужкової антени та штирьової дипольної антени. Перетворення не буде точним, але це дасть змогу оцінити розміри антени для подальшої оптимізації в програмному пакеті.

Загальна площа штирьової дипольної антени:

$$S_{\text{ДА}} = 2 \cdot S_{\text{кр.ДА}} + S_{\text{цил.ДА}}$$

$$d = \lambda/30 = 150/30 = 5 \text{ мм}$$

$$S_{\text{кр.ДА}} = \pi(d/2)^2 = 3,14(5/2)^2 = 19,625 \text{ мм}^2$$

$$S_{\text{цил.ДА}} = 2\pi(d/2)a = 2\pi(d/2)(\lambda/2)k = 2 \cdot 3,14(5/2)(150/2) \cdot 0,85 = 1000,875 \text{ мм}^2$$

$$S_{\text{ДА}} = 2 \cdot 19,625 + 1000,875 = 1000,875 \text{ мм}^2$$

Наближені геометричні розміри мікросмужкової антени:

$$S_{\text{МСА}} = S_{\text{ДА}}$$

$$S_{\text{МСА}} = a \cdot b$$

$$a = k(\lambda/2) = 0,85(150/2) = 63,75 \text{ мм}$$

$$b = S_{\text{ДА}}/a = 1000,875/63,75 = 16 \text{ мм}$$

Отримані результати КСХН представлені на Рис. 2.3.2

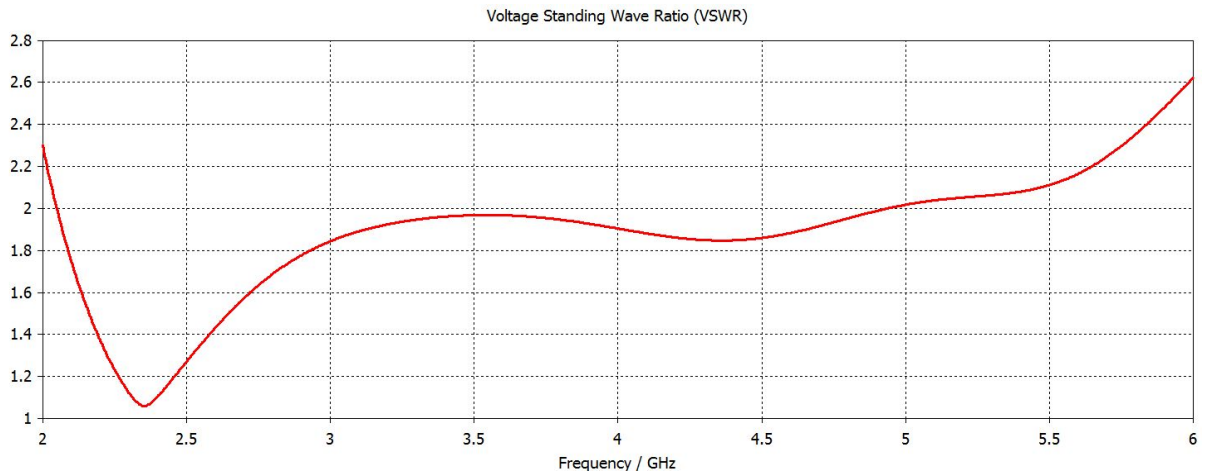


Рис. 2.3.2

Далі використовується плавний експоненційний розкрив для покращення узгодження антени з вільним простором. Для цього скористаємося формулами для розрахунку розкриву антени Вівальді. Формула для розрахунку координат внутрішнього розкриву [12]:

$$y_{\text{внутр.}} = c_1 \cdot e^{(F_1 \cdot x_{\text{внутр.}})} + c_2$$

де: c_1 , c_2 - це константи, F_1 - фактор розкриву.

Формула для розрахунку зовнішнього плавного переходу:

$$y_{\text{пер.}} = c_2 \cdot e^{(F_2 \cdot x_{\text{пер.}})} + c_3$$

де: c_2 , c_3 - це константи, F_2 - фактор розкриву. Отримані значення по геометричним розмірам були експортовані в програмний пакет CST Microwave Studio, де відбувалася подальша оптимізація та аналіз [8]. В результаті моделювання та програмної оптимізації досліджувана антена набула наступного вигляду Рис. 2.3.3, були отримані наступні результати КСХН (Рис. 2.3.5) та діаграми спрямованості (Рис. 2.3.6).

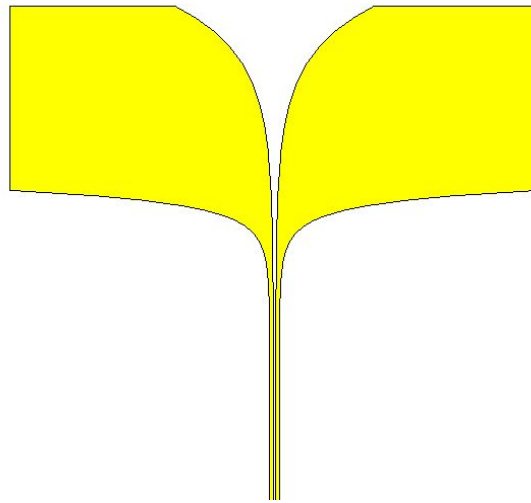


Рис. 2.3.3

В ході оптимізації антени для досягнення необхідного рівня узгодження необхідно виконати КМСЛ з хвильовим опором 110 Ом. Для розрахунку геометрії лінії (Рис. 2.3.4) існує наближена формула [9]:

$$Z_d = \frac{174}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \cdot \ln \frac{5,98h}{(0,8w+t)} \cdot (1 - 0,48 \exp(-0,96(d/h)))$$

Перетворимо її для отримання значення d.

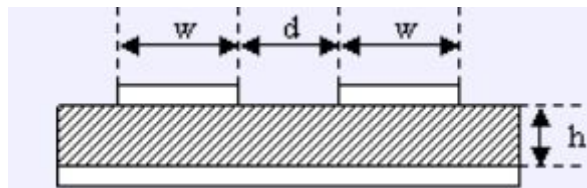


Рис. 2.3.4 Поперечний переріз КМСЛ

Розраховане значення ширини щілинної лінії було отримане таким:

d= 250 мкм.

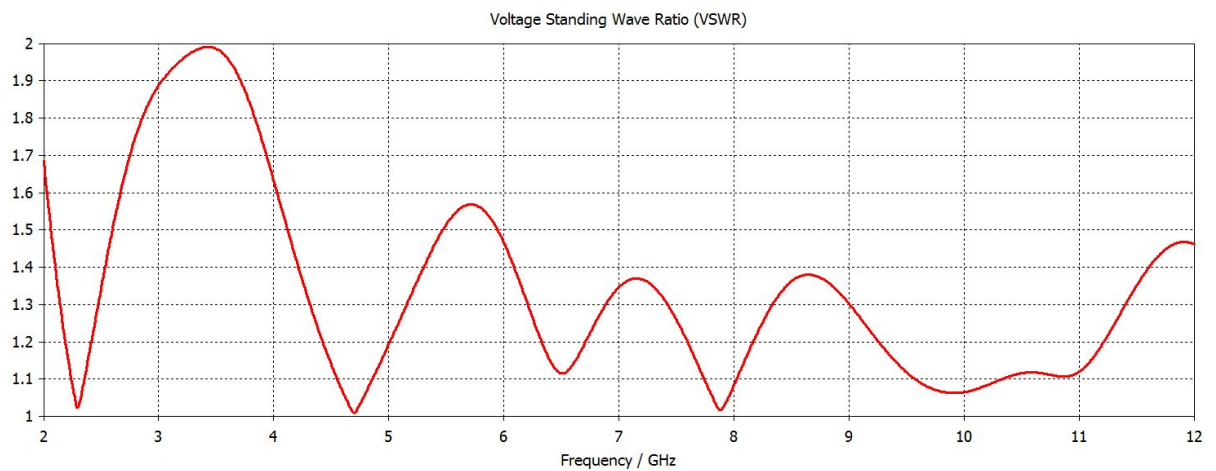


Рис. 2.3.5

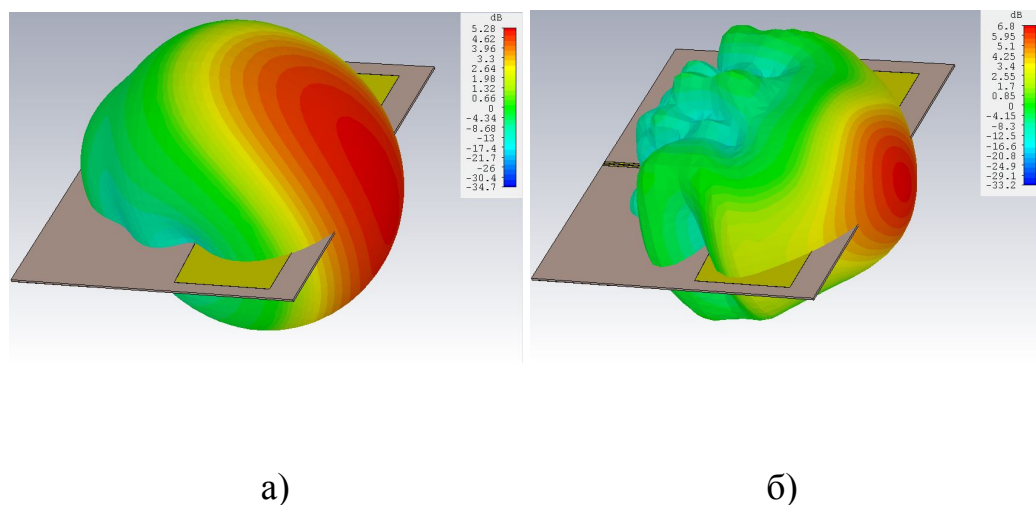


Рис. 2.3.6. Діаграми спрямованості досліджуваної антени: а) на частоті 2 ГГц; б) на частоті 12 ГГц

2.4 Розрахунок системи живлення досліджуваної антени

Система живлення (далі СЖ) досліджуваної антени повинна перетворити енергію, отриману з стандартного радіо інтерфейсу, наприклад коаксіальної лінії з хвильовим опором 50 Ом, в диференційне живлення КМСЛ з хвильовим опором 110 Ом, також забезпечувати вказані в технічному завданні робочу смугу частот та мінімальне значення рівня затухання. Потрібно отримати протифазність в лінії живлення в широкій

смузі частот. Серед розглянутих в першому розділі способів живлення КМСЛ найбільш широкосмуговим виявилася схема з збудженням ЩЛ.

Схема запропонованого живлення показана на Рис. 2.4.1

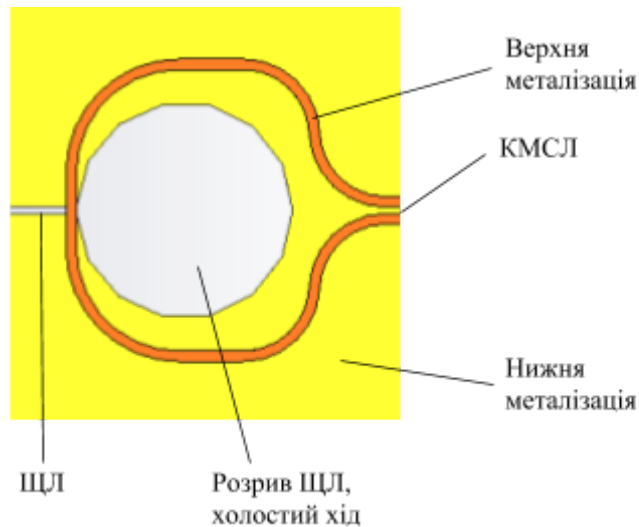


Рис. 2.4.1 Перетворення КМСЛ в ЩЛ

Для знаходження ширини ЩЛ (Рис. 2.4.2) живлення для досліджуваної антени скористаємось формулою:

$$Z_d = 2Z_0(1 - 0,48 \cdot \exp(-0.96(d/h))),$$

де Z_d - це хвильовий опір КМСЛ живлення раніше розрахованої антени, який має бути рівним опору 110 Ом.

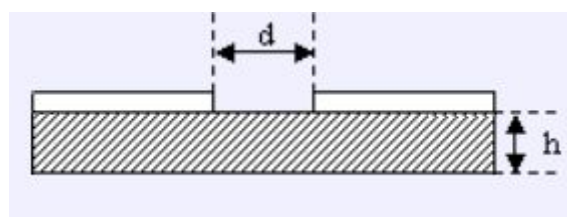


Рис. 2.4.2

Розраховане значення ширини щілинної лінії було отримане рівним $d = 250$ мкм. Для отримання режиму холостого ходу в точці збудження КМСЛ стандартний чвертьхвильовий відрізок ЩЛ, з метою розширення смуги робочих частот було замінено кільцем відповідного радіуса.

Для більш точного розрахунку запропонована топологія живлення КМСЛ аналізувалися в програмному середовищі електродинамічного аналізу CST Microwave studio. На Рис. 2.4.3 промодельовано прямі та зворотні втрати з урахуванням втрат в діелектрику. З отриманих графіків видно, що зворотні втрати не гірші -10 дБ, прямі втрати не гірші -3 дБ, що достатньо для використання в даній конфігурації. На Рис. 2.4.4 приведені фазові характеристики вихідної лінії живлення, видно що в розглянутому діапазоні частот розбаланс фаз не перевищує 5 градусів.

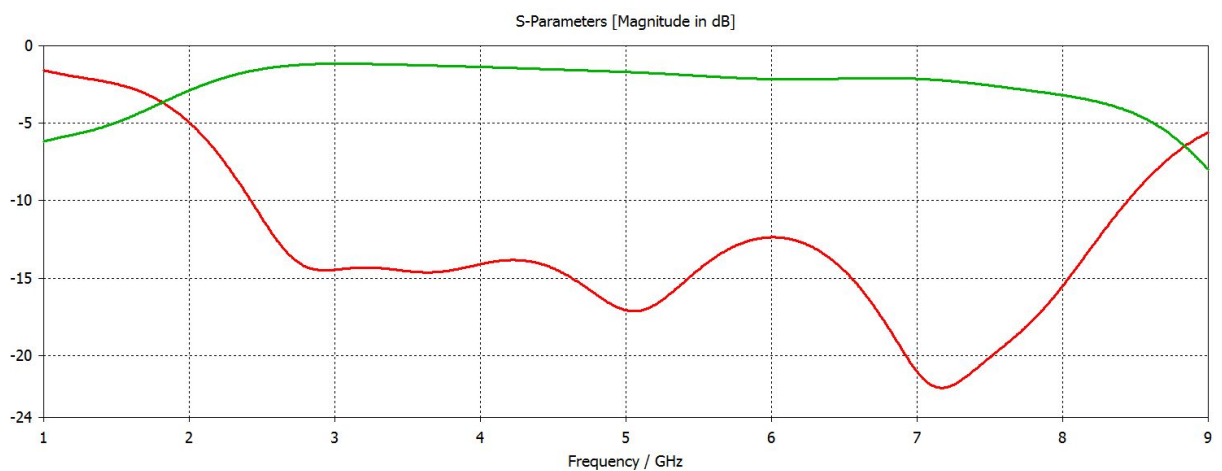


Рис. 2.4.3. Зеленим кольором позначено прямі втрати, червоним кольором позначено зворотні втрати

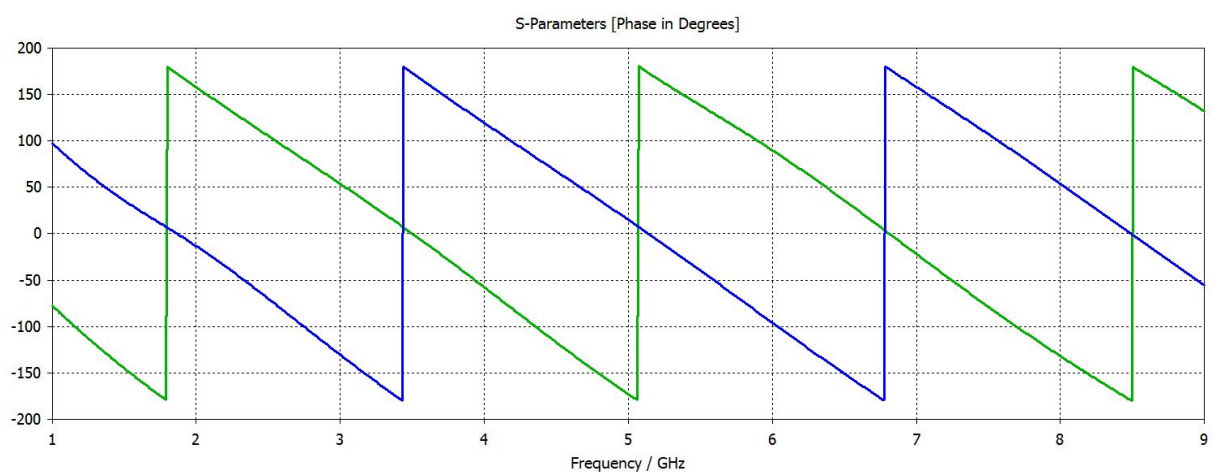


Рис. 2.4.4 Баланс фаз на виході КМСЛ

Для переходу з ЩЛ на МСЛ в точці збудження знаходиться структура, що має еквівалент ємності і на робочих частотах утворює КЗ. Зовнішній вигляд та принцип роботи показано на Рис. 2.4.5.

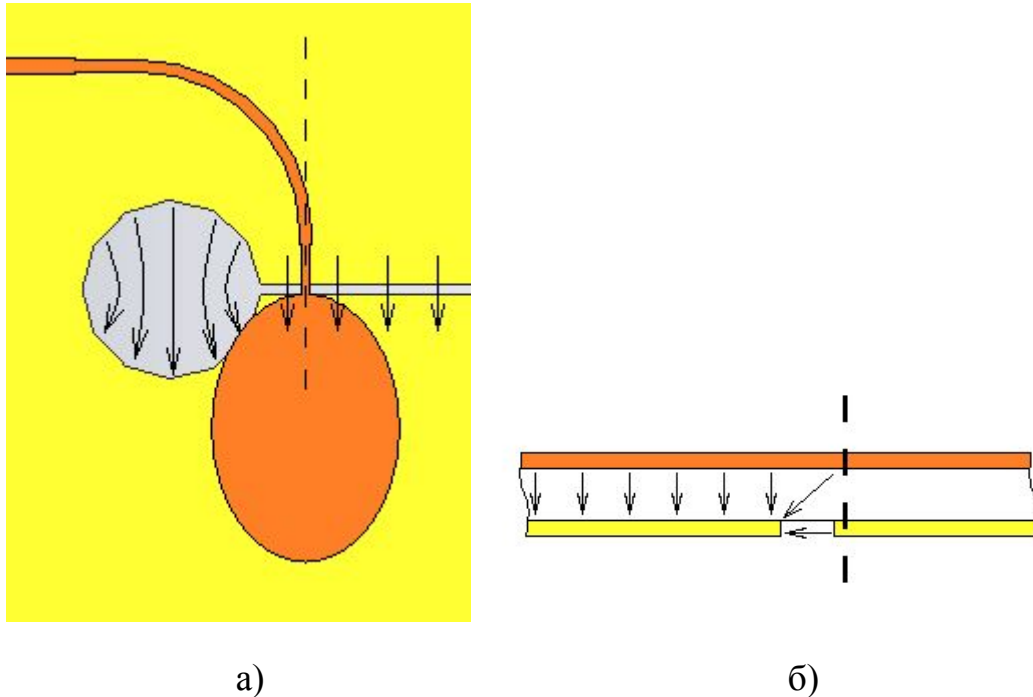


Рис. 2.4.5. а) Топологія переходу з ЩЛ на МСЛ; б) Принцип дії переходу

З метою розширення смуги робочих частот кільце встановлено відповідного радіуса та форми.

На Рис. 2.4.3 промодельовано зворотні втрати з урахуванням втрат в діелектрику. З отриманого графіка видно, що зворотні втрати не гірші -10 дБ. На Рис. 2.4.4 прямі втрати не гірші -3 дБ, що достатньо для використання в даній конфігурації.

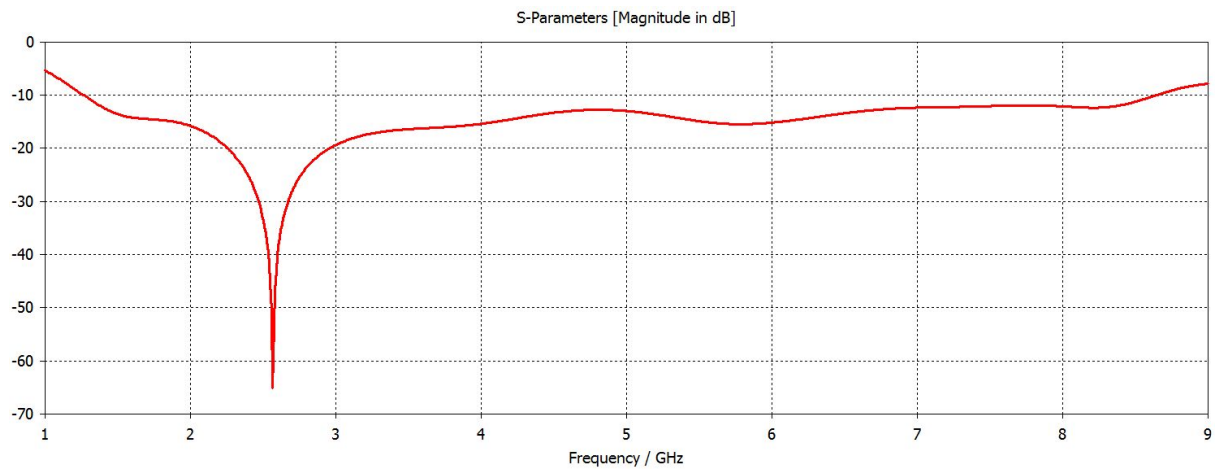


Рис. 2.4.3. Зворотні втрати S_{11}

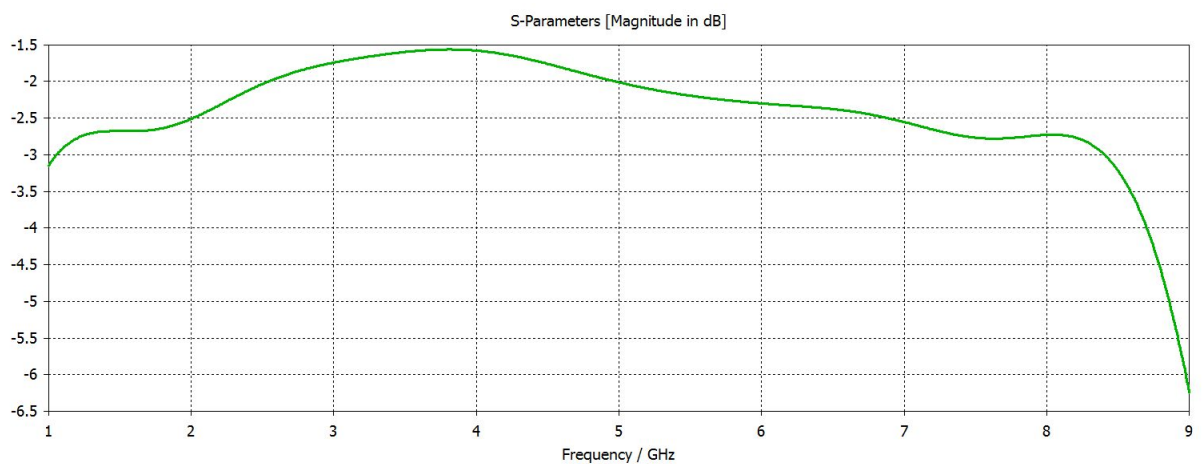


Рис. 2.4.4 Прямі втрати S_{21}

2.5 Результати моделювання

Електродинамічні характеристики антени було промодельовано в програмному пакеті CST Microwave Studio, який використовує метод скінченних різниць в часовій області для розрахунків різноманітних електродинамічних структур. Зовнішній вигляд досліджуваної антени з системою живлення показано на рис. 2.5.1

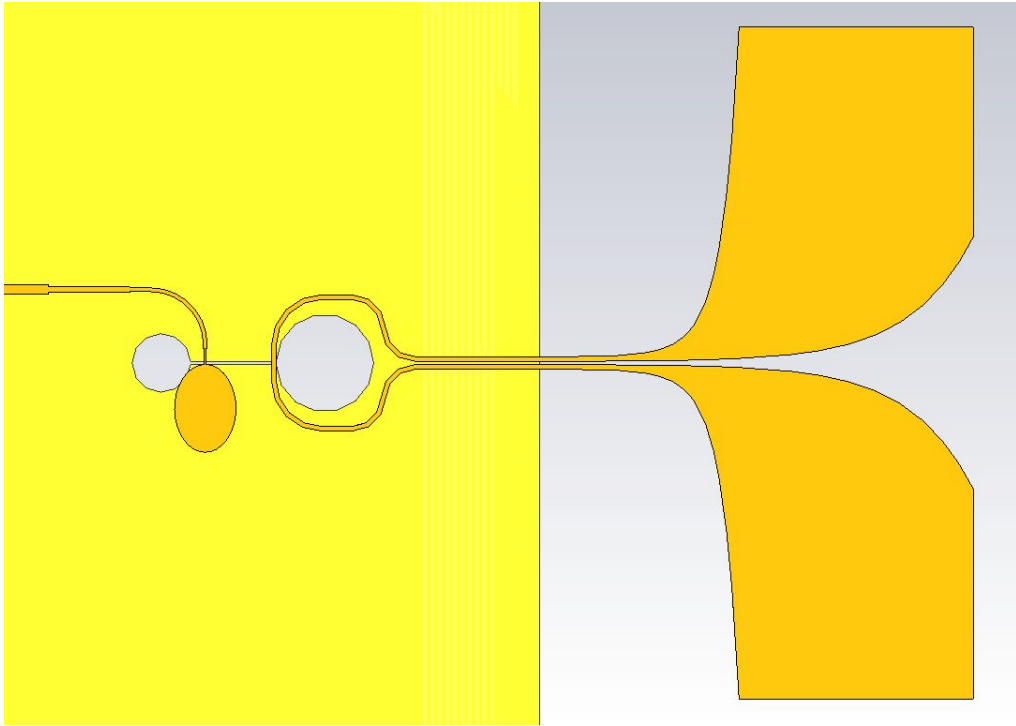


Рисунок 2.5.1

При моделюванні антена збуджувалася ідеальним джерелом напруги із внутрішнім опором 50 Ом. Характеристика узгодження антени наведена на Рис. 2.5.2. Як видно, антена добре узгоджена і має смугу пропускання $\Delta f = 6$ ГГц по рівню КСХН = 2. На Рис. 2.5.3 Рис. 2.5.6 наведено діаграми спрямованості в двох площинах на частотах 2, 4, 8 ГГц відповідно. Відмітимо наявність заднього випромінювання на рівні -4дБ, обумовленого випромінювання з щілинної мікросмужкової лінії. В середньому ширина діаграми спрямованості за рівнем -3 дБ становить 120° в H -площині і 85° в E -площині. Середній коефіцієнт підсилення антени 4 дБ.

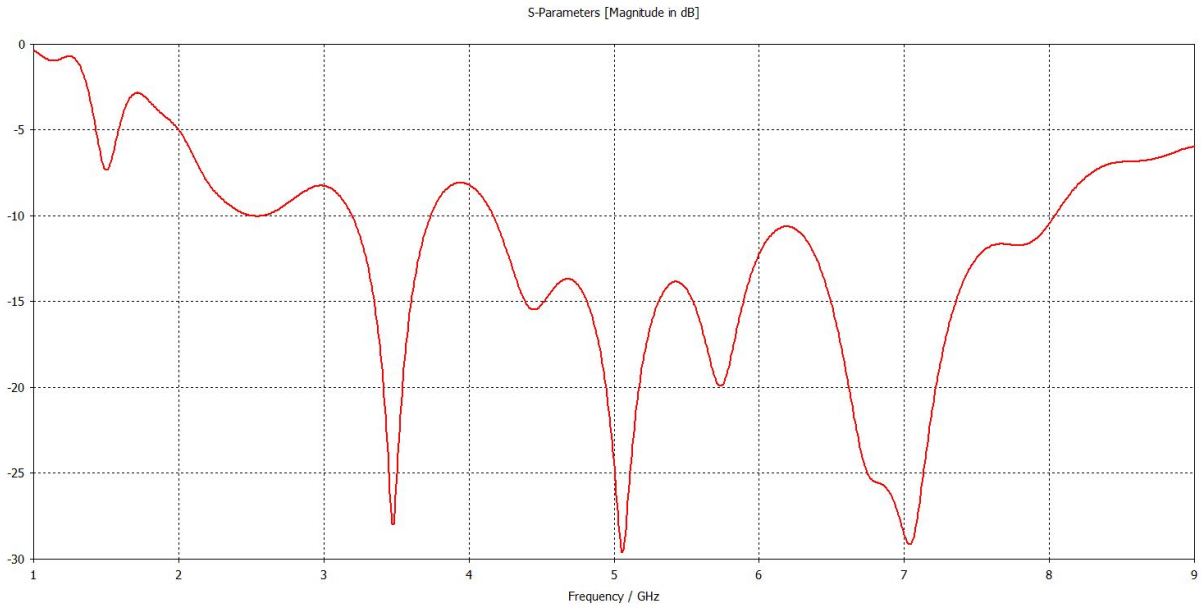


Рис. 2.5.2. Частотна залежність коефіцієнту відбиття

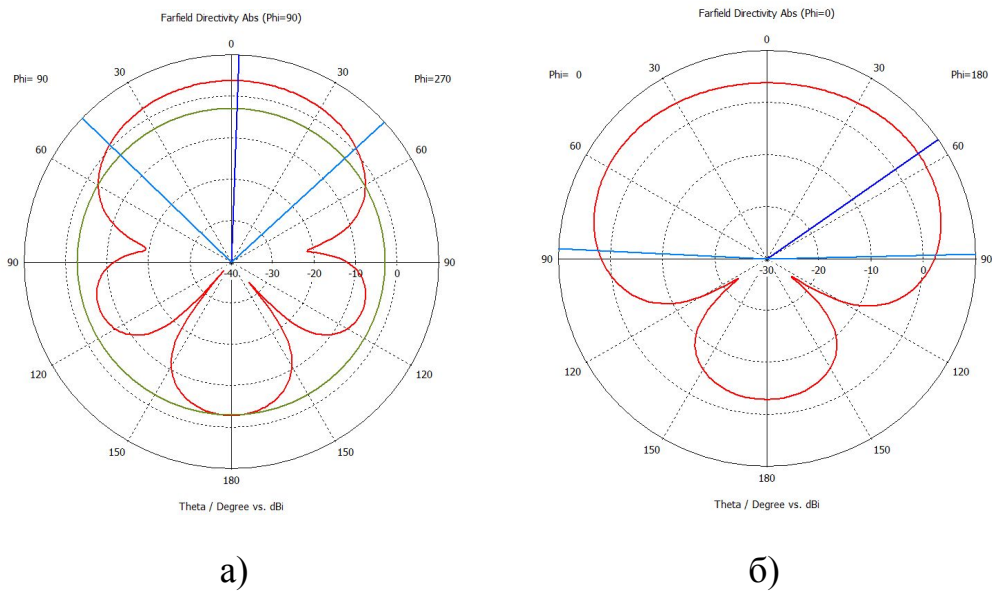


Рис. 2.5.3. Діаграми спрямованості досліджуваної антени на частоті 2 ГГц: а) в *E*-площині; б) в *H*-площині

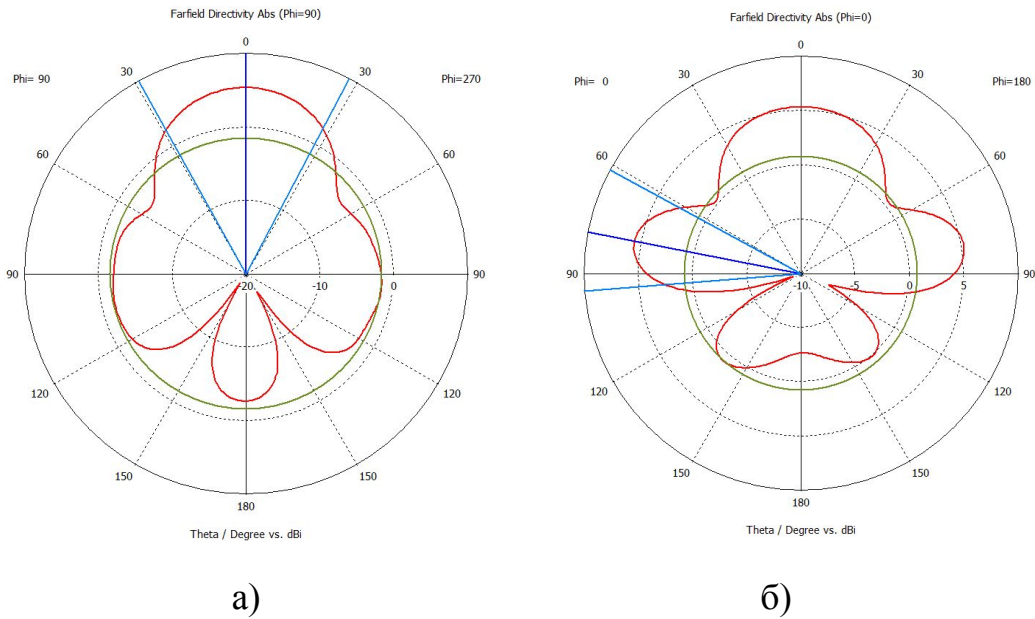


Рис. 2.5.4. Діаграми спрямованості досліджуваної антени на частоті 4 ГГц: а) в Е-площині; б) в Н-площині

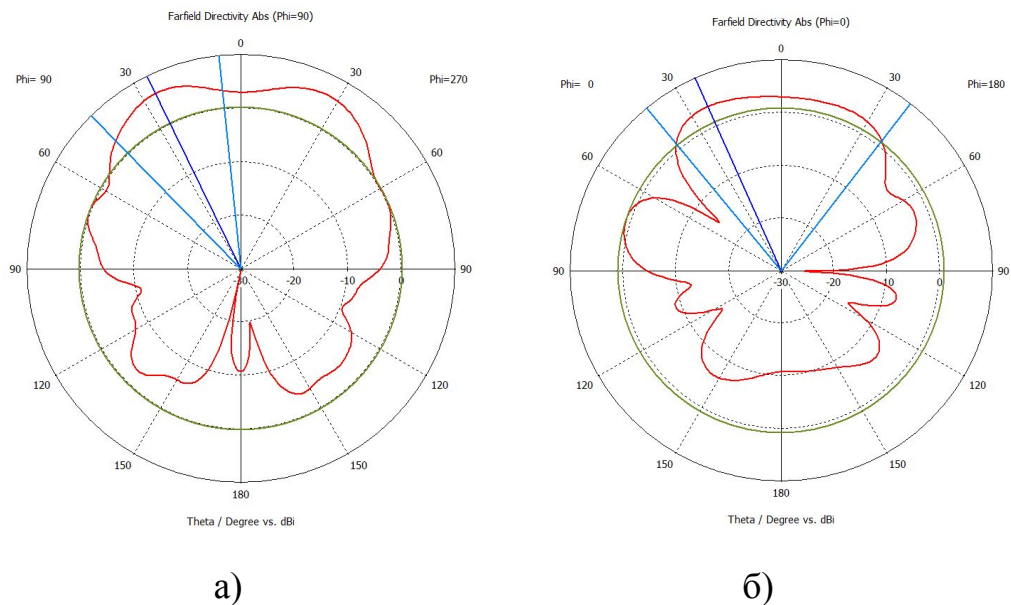


Рис. 2.5.6. Діаграми спрямованості досліджуваної антени на частоті 8 ГГц: а) в Е-площині; б) в Н-площині

Коефіцієнт підсилення досліджуваної антени в осьовому напрямку наведений на Рис. 2.5.7.

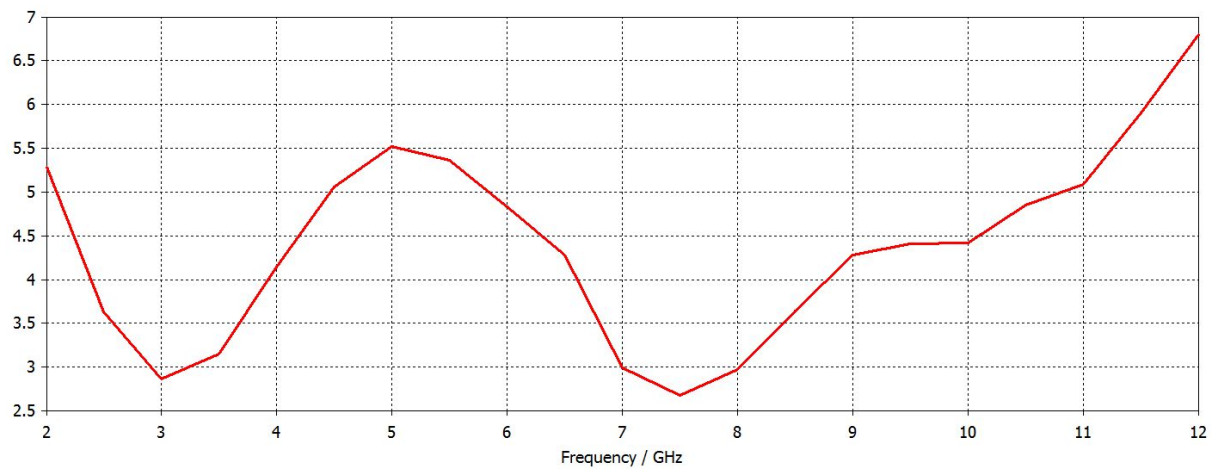


Рисунок 2.5.7

Оскільки апертура антени стає більша за довжину хвилі, починають виникати дифракційні явища, які призводять до того, що діаграма спрямованості починає роздвоюватися і в осьовому напрямку коефіцієнт підсилення падає.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вимірювання характеристики узгодження S11 та характеристики передачі S21 системи живлення

Для вимірювання параметрів узгодження S11 та передачі S21 системи живлення було виготовлено експериментальний зразок, що складається із двох ідентичних схем живлення включених зустрічно. Тобто такий прототип має симетричну топологію відносно місця з'єднання з антеною. Для вимірювання на вході і виході зразка паяється коаксіальний кабель (рис. 3.1.1). Оскільки схема для вимірювань складається з двох симетричних частин, результати вимірювань характеристики затухання потрібно ділити на 2 для отримання реальних значень.

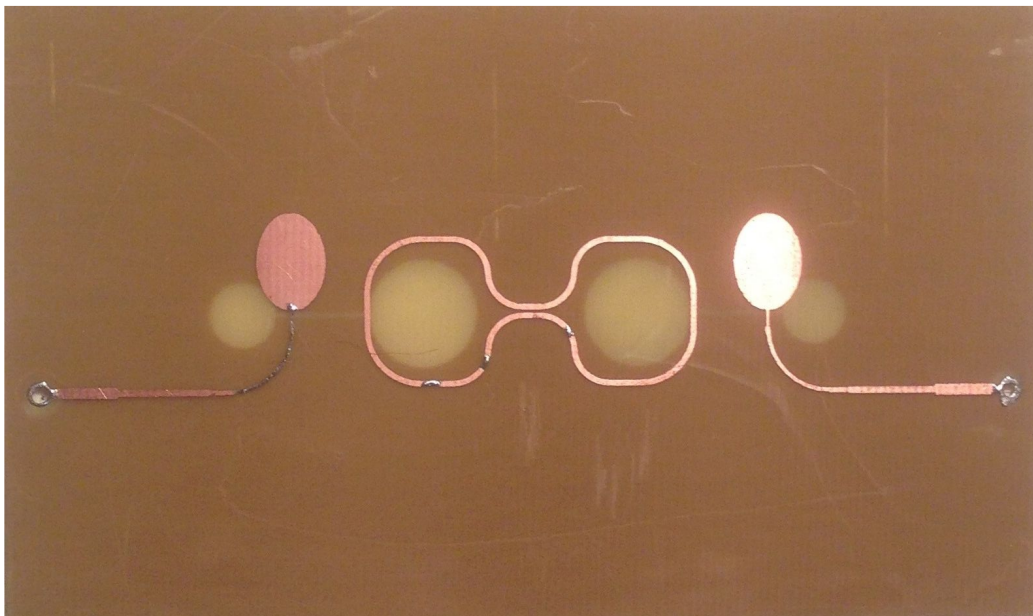


Рисунок 3.1.1

Вимірювання характеристик було перевірено в смузі частот від 2 до 8,5 ГГц виходячи з технічних можливостей пристрою, яким було виконано виміри. Для вимірювання характеристик відбиття по входу системи

живлення було використано стандартний панорамний вимірювач КСХН та послаблення (три генераторні блоки та індикаторний блок Я2Р-67). Схема стенду для вимірювання зображена на рис. 3.1.2.

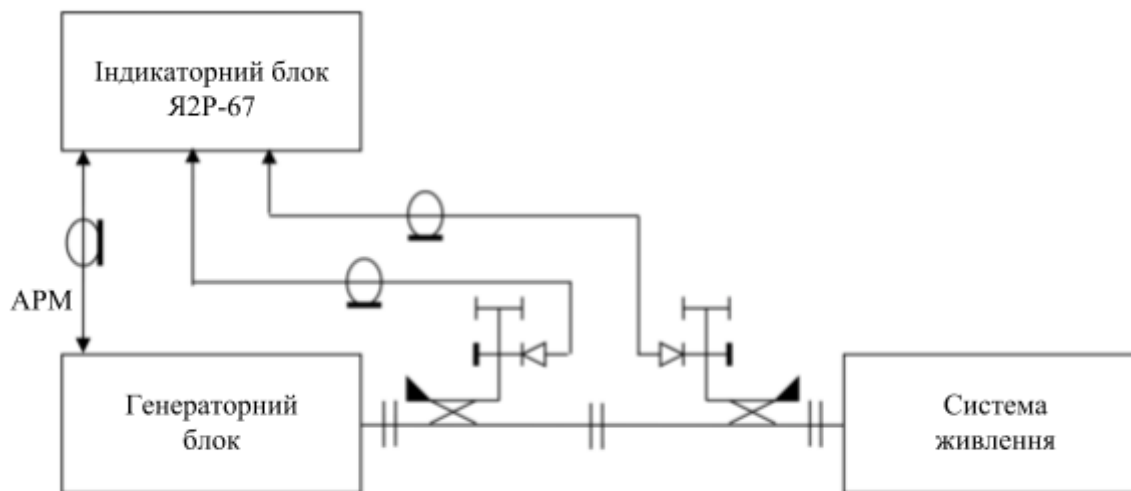


Рисунок 3.1.2

Для вимірювання характеристик затухання системи живлення було використано стандартний панорамний вимірювач КСХН та послаблення (три генераторні блоки та індикаторний блок Я2Р-67). Схема стенду для вимірювання зображена на рис. 3.1.3.

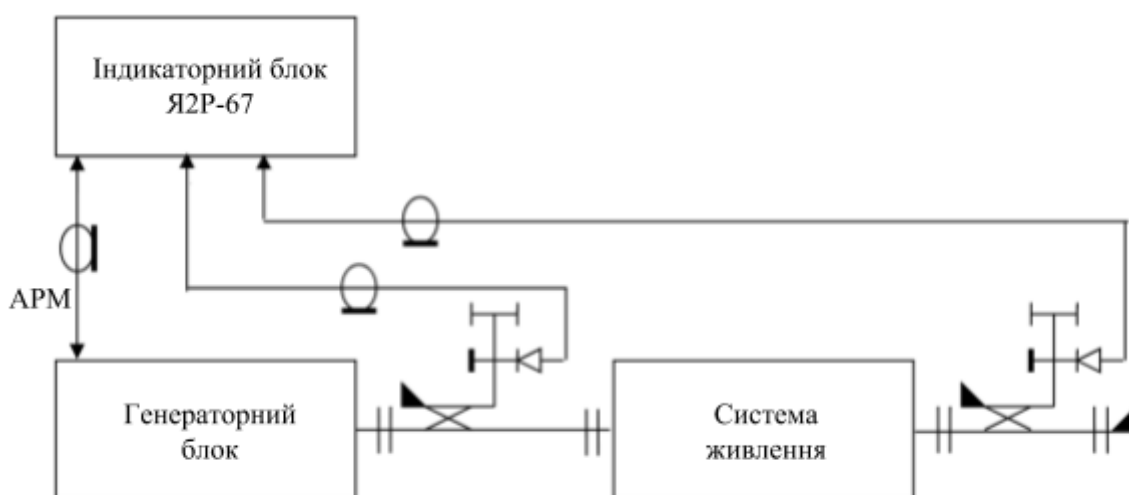


Рисунок 3.1.3

Отримані експериментальні результати показані в таблиці 3.2.3.

Таблиця 3.2.3

Частота, ГГц	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5
S11, дБ	-2,5	-5	-17	-12	-14	-15	-22	-12	-10	-8	-15	-9	-15	-13
S21, дБ	-6,5	-4,6	-2,4	-2,7	-2,8	-2,8	-3,3	-3,3	-4	-4,3	-4,2	-5	-5,5	-6,1

На графіку (рис. 3.1.4) показані неперервною червоною лінією значення параметра S11 системи живлення отримані за допомогою електродинамічного моделювання. Пунктиром позначено сполучення вимірних значень, які в свою чергу вказані ромбами. За такою ж аналогією на рис. 3.1.5 показані значення параметра S21 системи живлення.

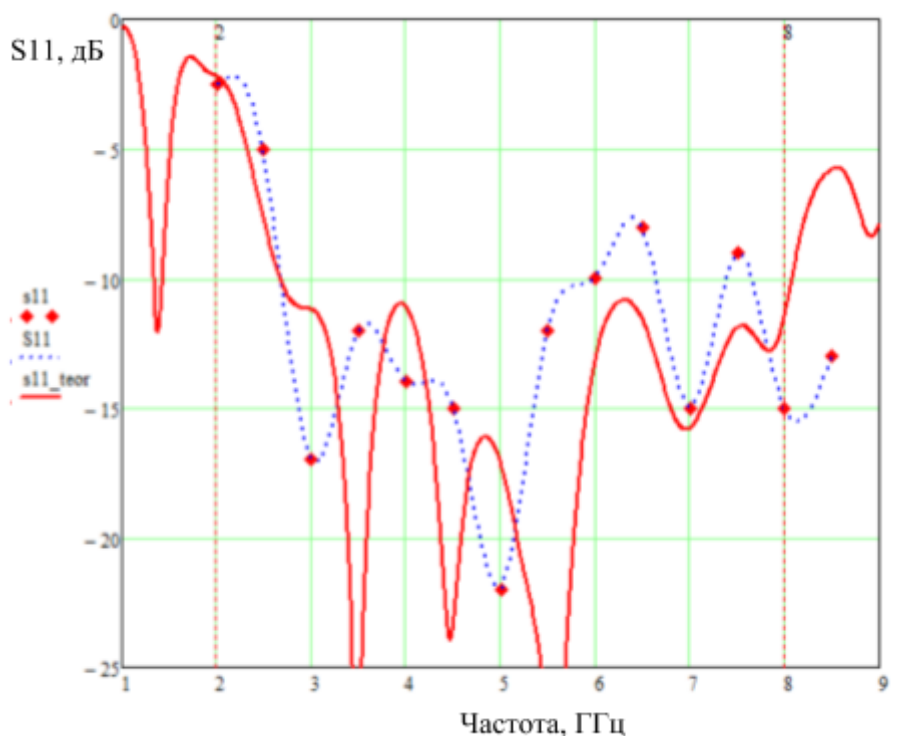


Рисунок 3.1.4: порівняння експериментальних та змодельованих значень параметру S_{11} системи живлення

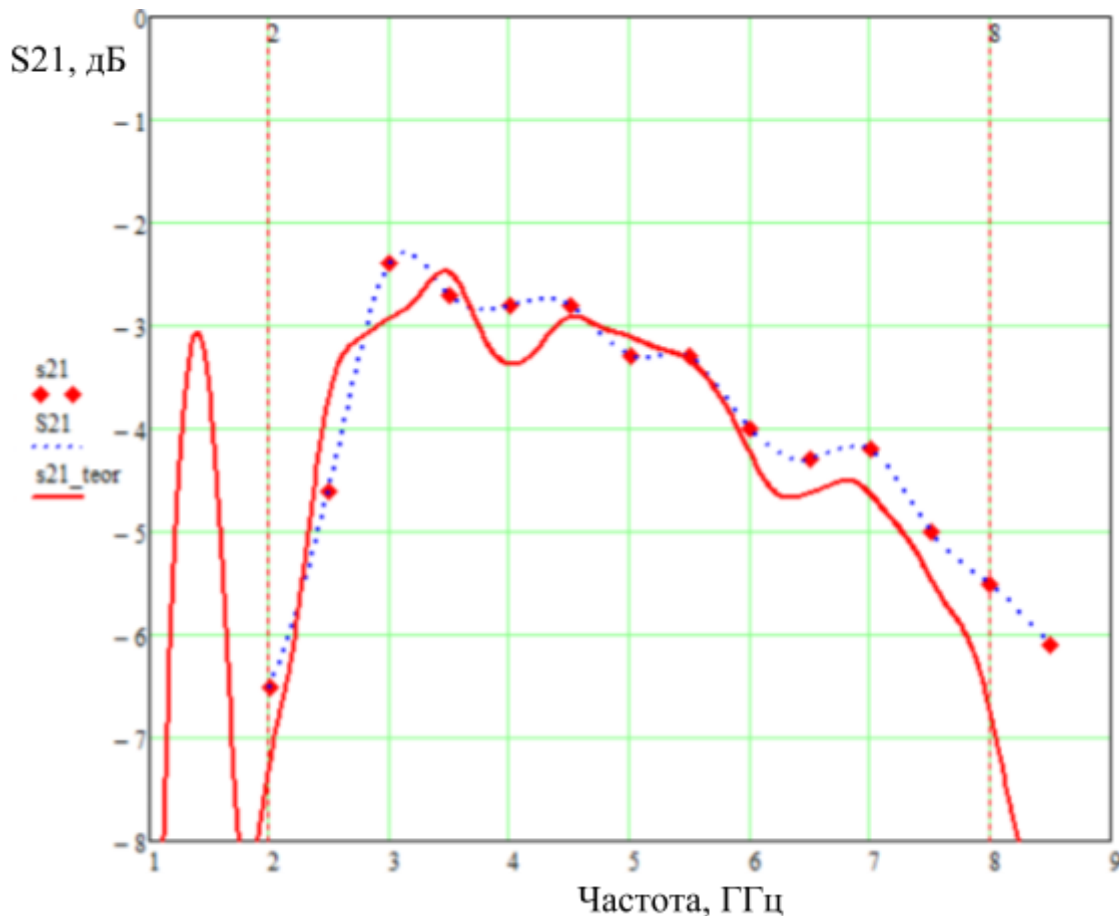


Рисунок 3.1.5: порівняння експериментальних та змодельованих значень параметру S_{21} системи живлення

Оцінивши результати вимірювань, можна зробити висновок, що отримані експериментальні значення характеристики узгодження та затухання узгоджуються з результатами моделювання. Спостерігається чітка відповідність форм кривих, наприклад нахил кривої коефіцієнту передачі, резонанси характеристики S_{11} , частота зрізу. В діапазоні частот 6-8 ГГц експериментально визначені значення затухання рівні (2-3 дБ) є навіть нижчими за відповідні змодельовані значення. З результатів вимірювання схеми живлення можна зробити висновок, що робочий діапазон частот становить 2,5...8,5 ГГц. В цьому діапазоні узгодження по

входу є не гіршим за -7 дБ. Втрати в робочому діапазоні не перевищують 3 дБ, при чому найменші втрати спостерігаються на частоті 3 ГГц і становлять 1.2 дБ.

3.2 Вимірювання характеристики узгодження S11 досліджуваної антени із системою живлення

Виготовлений експериментальний зразок антени (рис. 3.2.1) з системою живлення від коаксіального фідера було перевірено на узгодження в смузі частот від 2 до 8,5 ГГц. Для вимірювання характеристик відбиття по входу антени було використано стандартний панорамний вимірювач КСХН та послаблення (три генераторні блоки та індикаторний блок Я2Р-67). Схема стенду для вимірювання зображена на рис. 3.2.2.

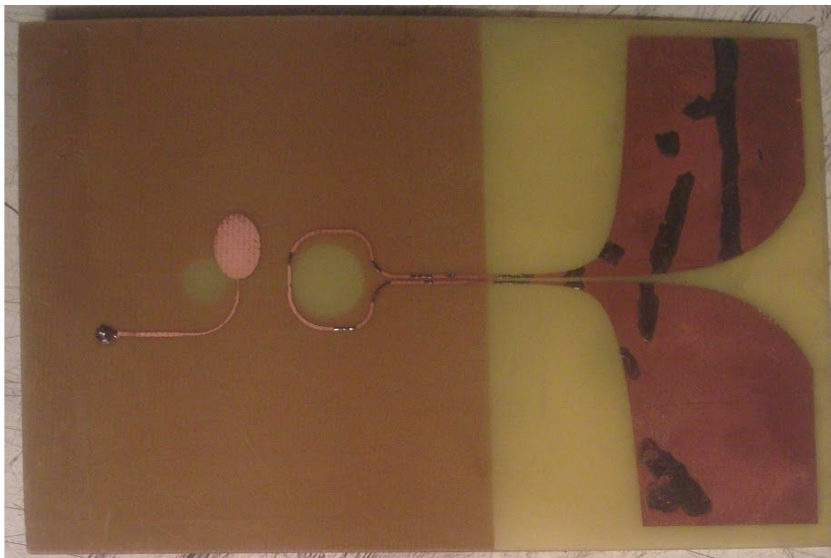


Рисунок 3.2.1

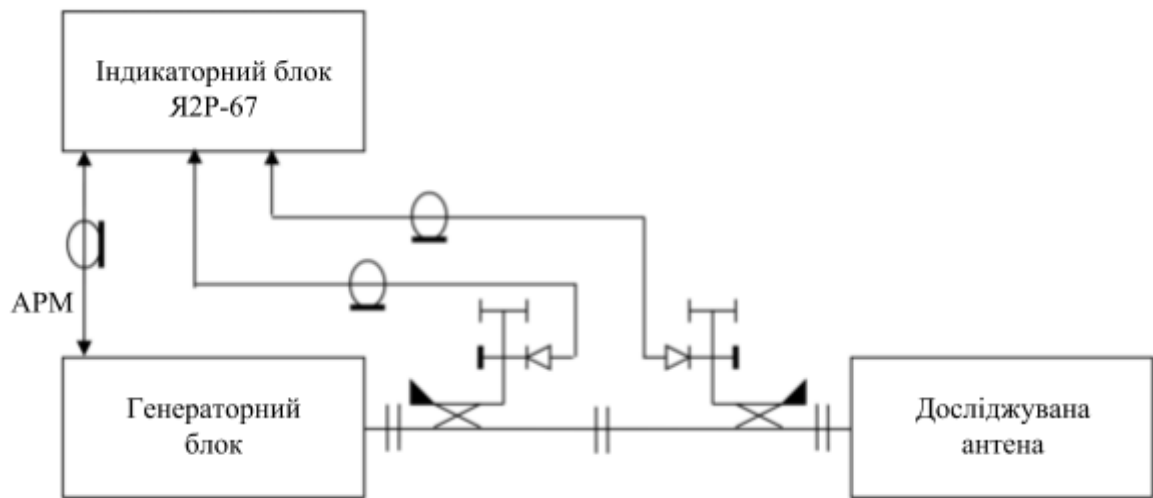


Рис. 3.2.2

Отримані експериментальні результати показані в таблиці 3.2.3

Таблиця 3.2.3

Частота, ГГц	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5
S11, дБ	-4	-8	-14	-8,2	-1 1	-13	-12	-12,3	-11, 5	-7,5	-12	-17	-7,5	-4

На графіку (рис. 3.2.4) показані неперервною червоною лінією значення параметра S11 досліджуваної антени з системою живлення отримані в процесі електродинамічного моделювання. Пунктиром позначено сполучення вимірних значень, які в свою чергу вказані ромбами.

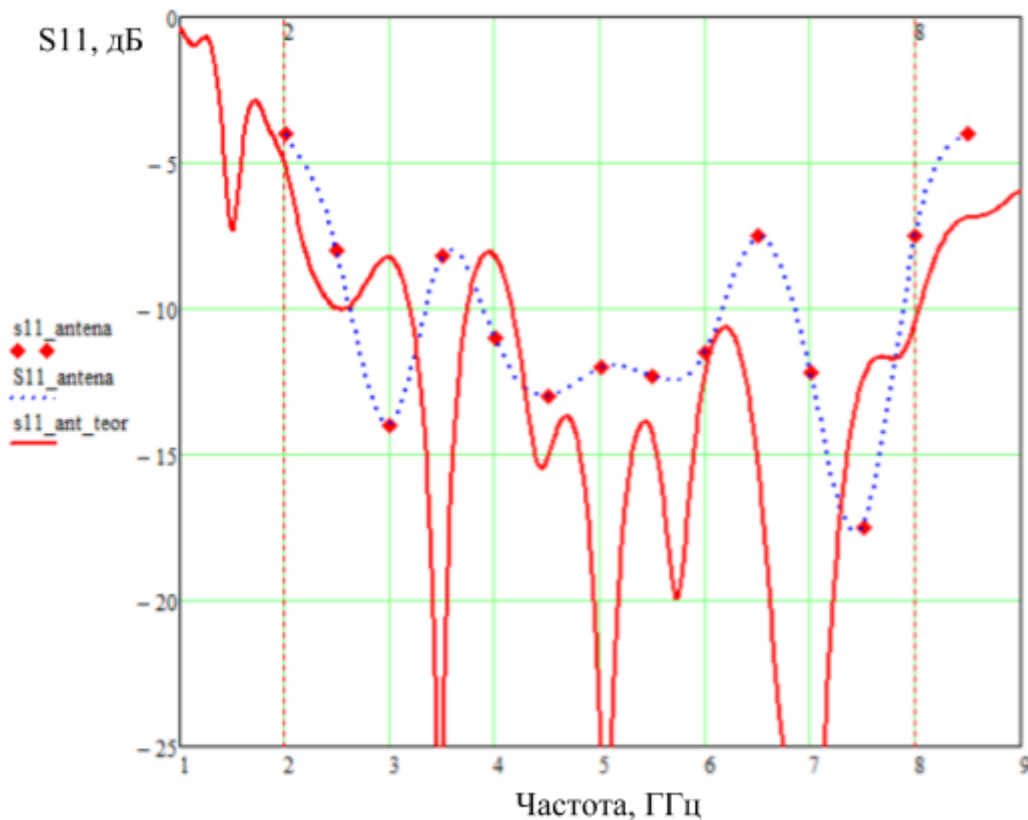


Рисунок 3.2.4: порівняння експериментальних та змодельованих значень параметру S_{11} досліджуваної антени

Оцінивши результати вимірювань, можна зробити висновок, що отримані практичні значення характеристики узгодження відповідають результатам моделювання, повторюючи основну форму експериментальної кривої, проте мають дещо гірші показники узгодження на певних частотах, наприклад пік на частоті 6.5 ГГц спричинений саме системою живлення, а не антеною. Такий висновок можна зробити порівнявши узгодження по входу антени із живленням та схеми живлення окремо. Однією з причин відмінностей може бути неточність виготовлення дослідного зразка. Проте загалом отримані результати є задовільними. З результатів характеристики узгодження та теоретичних розрахунків діаграми спрямованості можна остаточно прийняти рішення, що антена може працювати в діапазоні частот від 2 до 8 ГГц.

4. РОЗРАХУНОК АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

4.1 Антенна решітка 2x1

Конструкція антенної решітки (далі АР) 2x1 представлена на Рис. 4.1.1 складається з двох елементів, розташованих на відстані приблизно рівній півдовжині хвилі на центральній частоті, живлення портів синфазне.

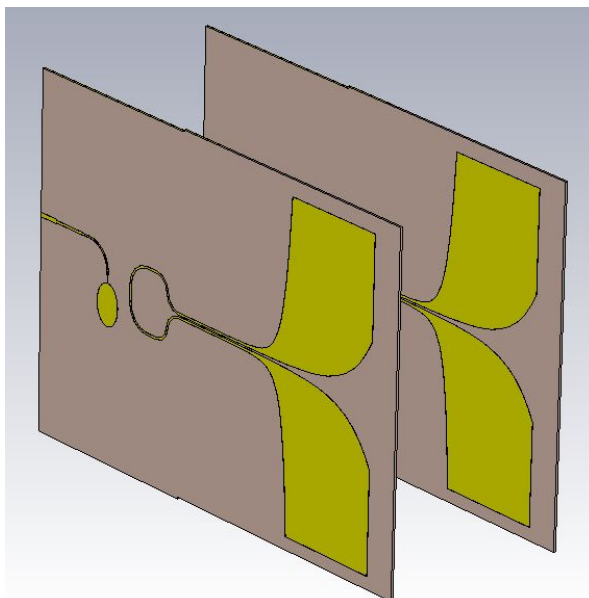


Рис. 4.1.1

Елементи решітки розташовані так, щоб оптимально збільшити коефіцієнт підсилення, оскільки в площині Е досліджувана антена має вузьку діаграму спрямованості, відповідно в площині Н антени розташовано ще один елемент решітки. Характеристика узгодження АР наведена на Рис. 4.1.2. Як видно, узгодження не погіршилося, проте проявився незначний взаємний вплив однієї антени на іншу.

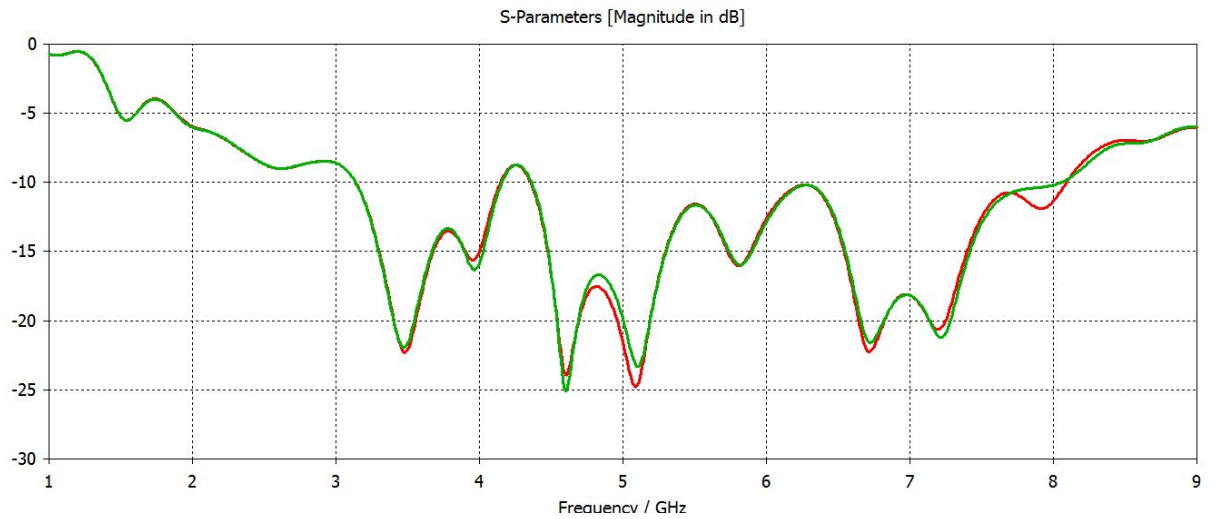


Рис. 4.1.2

На Рис. 4.1.3 Рис. 4.1.5 наведено діаграми спрямованості АР в двох площинах на частотах 2, 4, 8 ГГц відповідно.

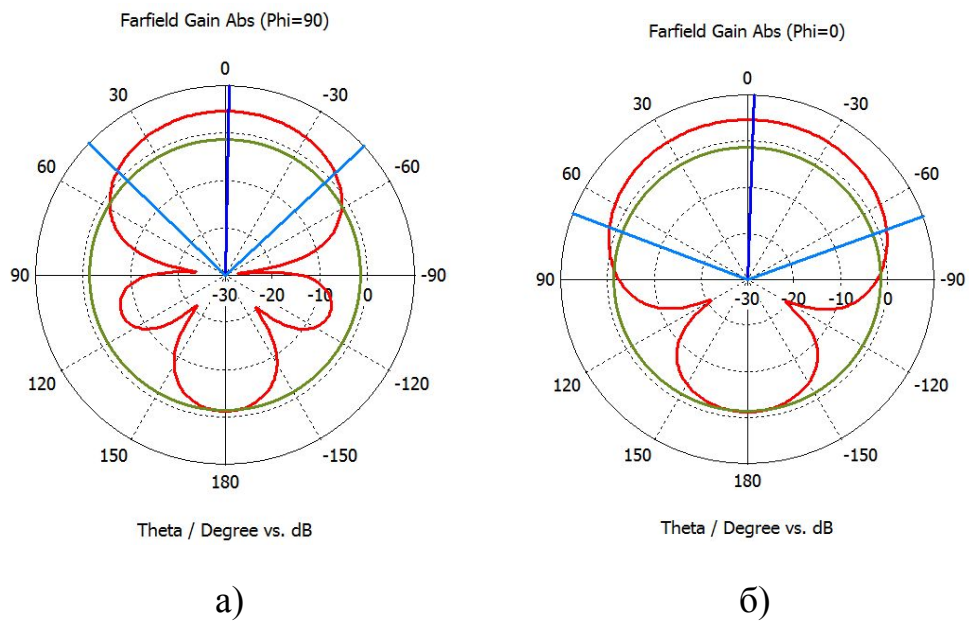
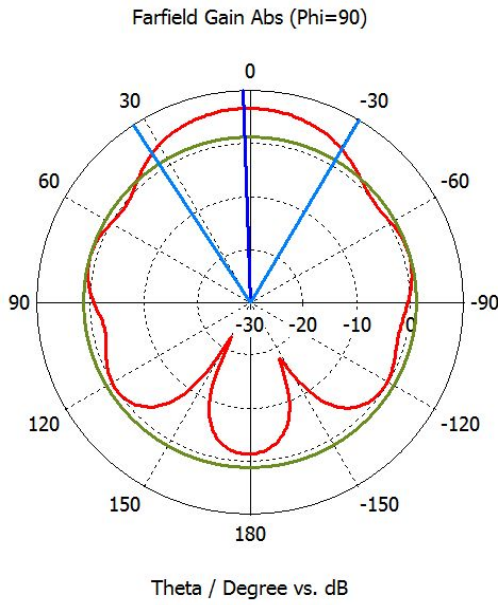
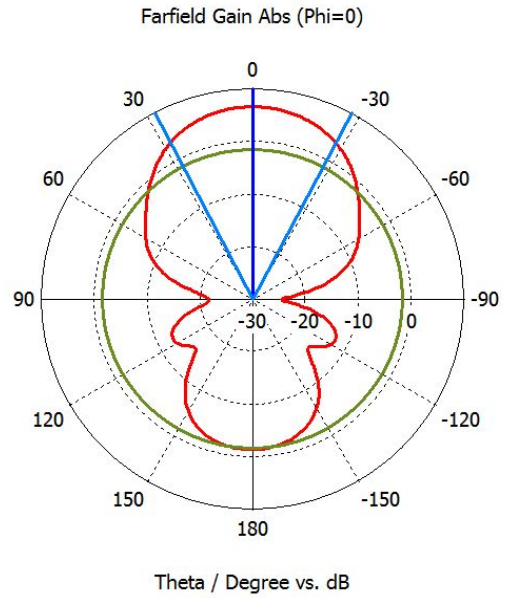


Рис. 4.1.3. Діаграми спрямованості АР 2x1 на частоті 2 ГГц: а) в Е-площині; б) в Н-площині

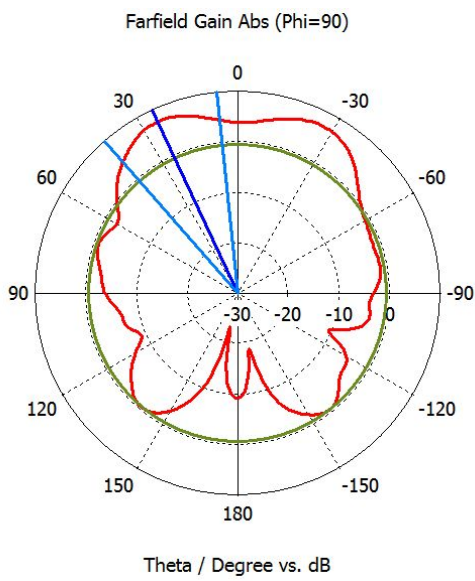


а)

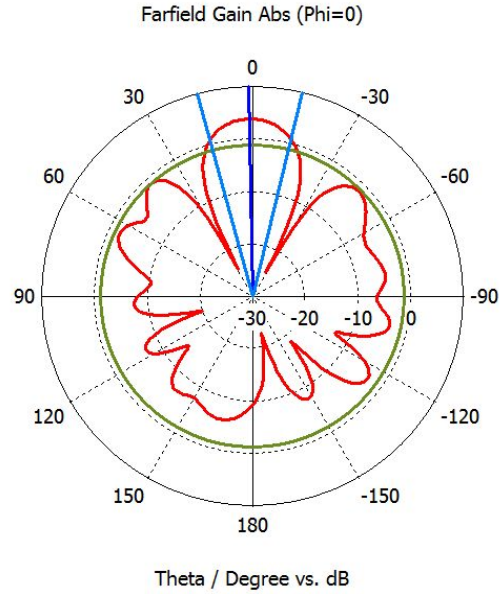


б)

Рис. 4.1.4. Діаграми спрямованості AP 2x1 на частоті 4 ГГц: а) в E-площині; б) в H-площині



а)



б)

Рис. 4.1.5. Діаграми спрямованості AP 2x1 на частоті 8 ГГц: а) в E-площині; б) в H-площині

Коефіцієнт підсилення AP 2x1 в осьовому напрямку, та максимальне значення підсилення наведені на Рис. 4.1.6.

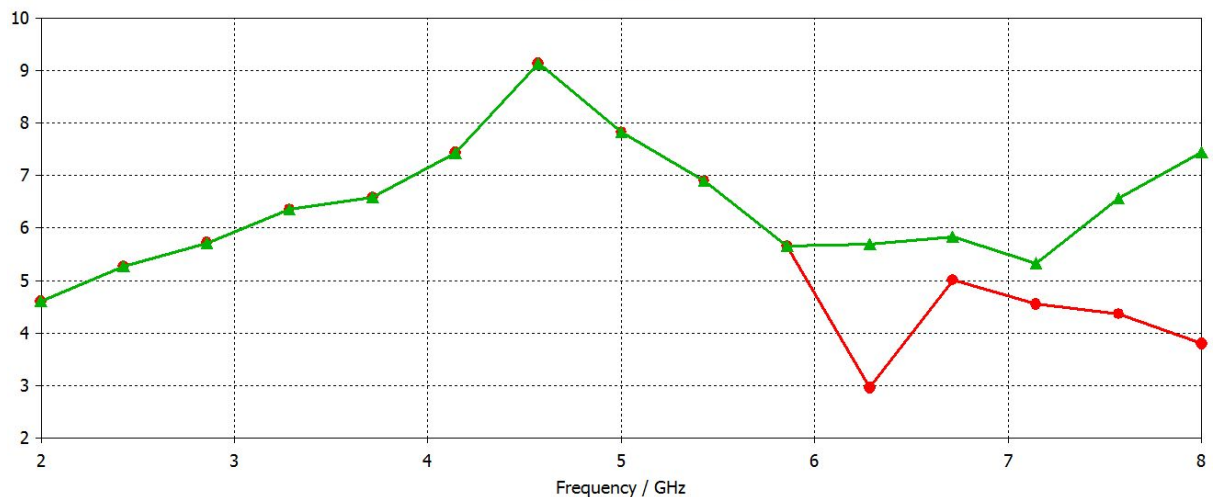


Рис. 4.1.6 Червоним кольором позначено коефіцієнт підсилення в осьовому напрямку, зеленим кольором позначено максимальний коефіцієнт підсилення

На частотах вище 6 ГГц апертура антени стає більша за довжину хвилі, починають виникати вторинні дифракційні максимуми діаграми спрямованості, які призводять до того, що діаграма спрямованості роздвоюється і в осьовому напрямку коефіцієнт підсилення падає в середньому на 1-3 дБ.

AP з двох елементів має вищий коефіцієнт підсилення ніж одна антена, і в максимумі досягає 9 дБі, що на 4 дБ вище, ніж в окремої антени на тій же самій частоті.

4.2 Антенна решітка 3x1

Конструкція AP 3x1 представлена на Рис. 4.2.1 складається з двох елементів, розташованих на відстані приблизно рівній півдовжини хвилі на центральній частоті, живлення портів синфазне.

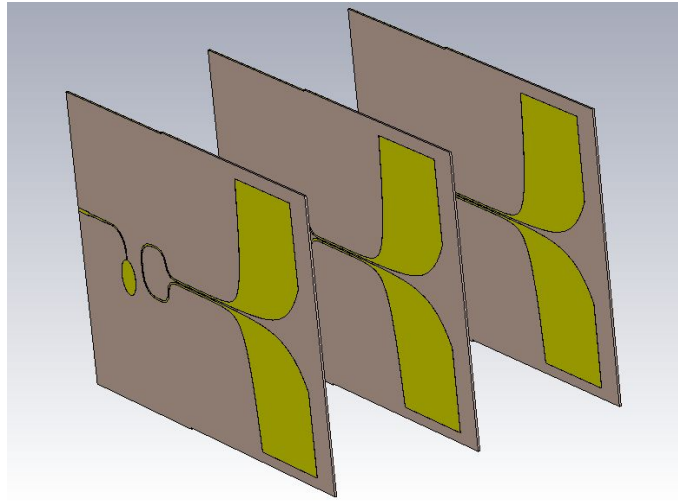


Рис. 4.2.1

Елементи решітки розташовані так, щоб оптимально збільшити коефіцієнт підсилення, оскільки в площині Н досліджувана антена має широку діаграму спрямованості, відповідно в площині Е антени розташовані паралельно. Характеристика узгодження кожного елемента AP наведена на Рис. 4.2.2. В AP 3x1 параметр S11 середньої антени погіршується за рахунок взаємного впливу бокових елементів. Для забезпечення необхідного узгодження потрібно додатково оптимізувати геометрію середнього елемента.

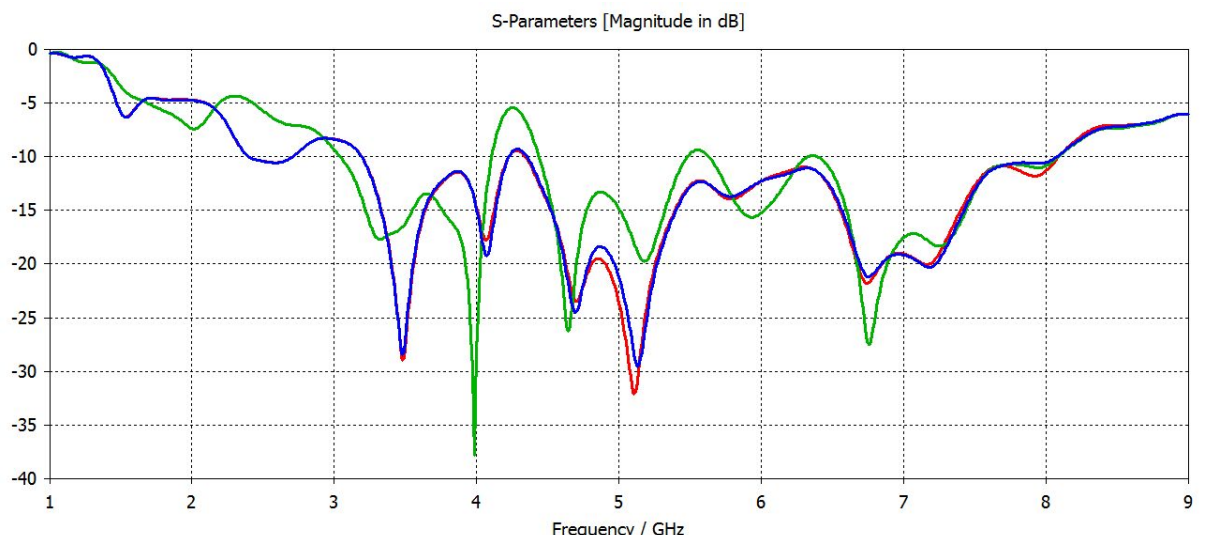


Рис. 4.2.2 Параметри S11 елементів антенної решітки. Зеленим кольором позначено параметр S11 середнього елемента антени.

На Рис. 4.2.3 Рис. 4.2.5 наведено діаграми спрямованості АР в двох площинах на частотах 2, 4, 8 ГГц відповідно.

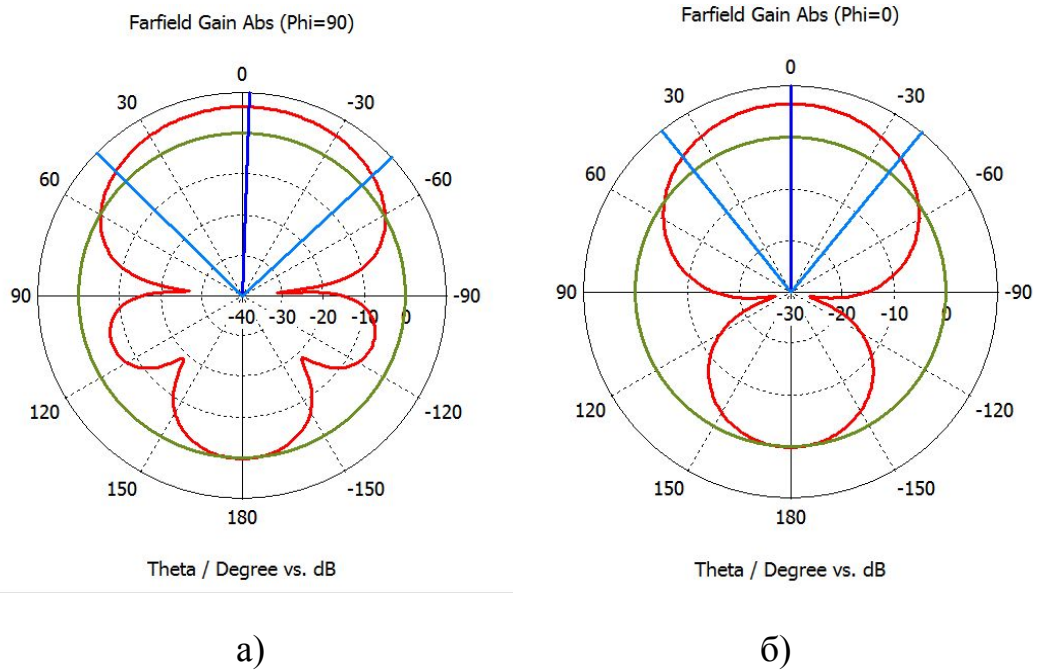


Рис. 4.2.3. Діаграми спрямованості АР 3x1 на частоті 2 ГГц: а) в Е-площині; б) в Н-площині

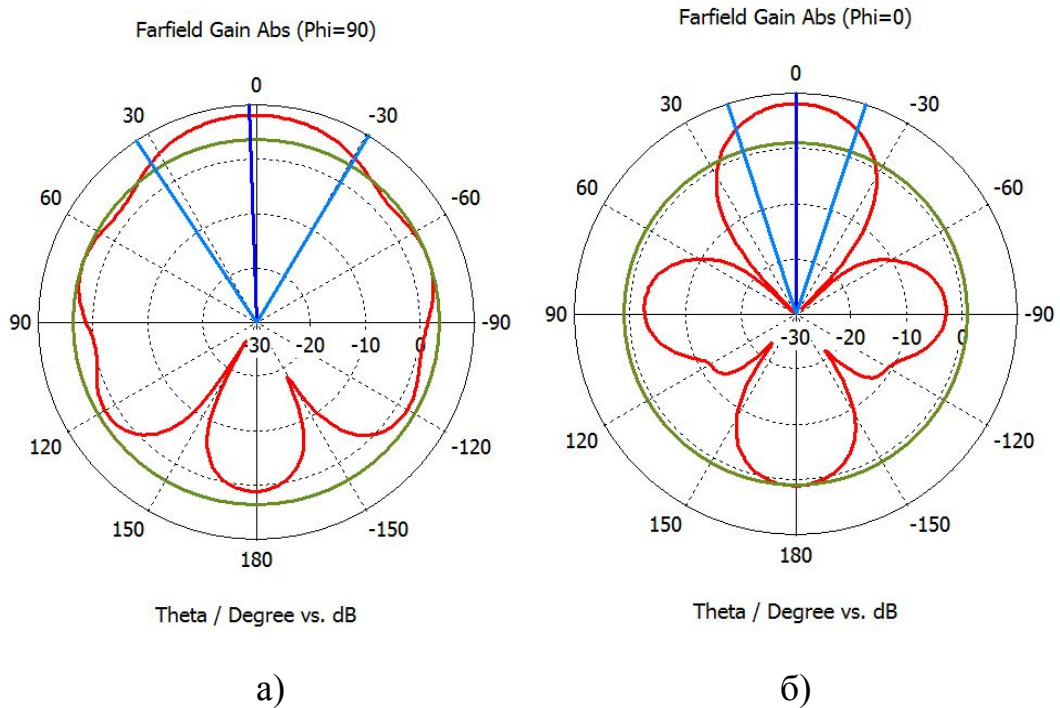


Рис. 4.2.4. Діаграми спрямованості АР 3x1 на частоті 4 ГГц: а) в Е-площині; б) в Н-площині

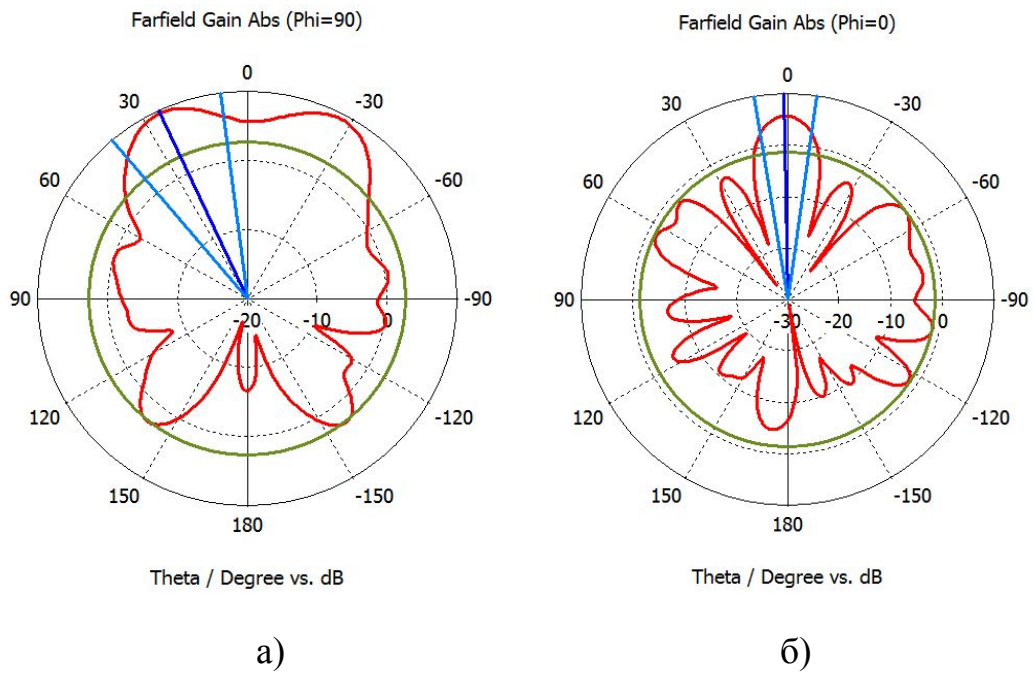


Рис. 4.2.5. Діаграми спрямованості АР 3x1 на частоті 8 ГГц: а) в *E*-площині; б) в *H*-площині

Коефіцієнт підсилення АР 3x1 в осьовому напрямку, та максимальне значення наведені на Рис. 4.2.6.

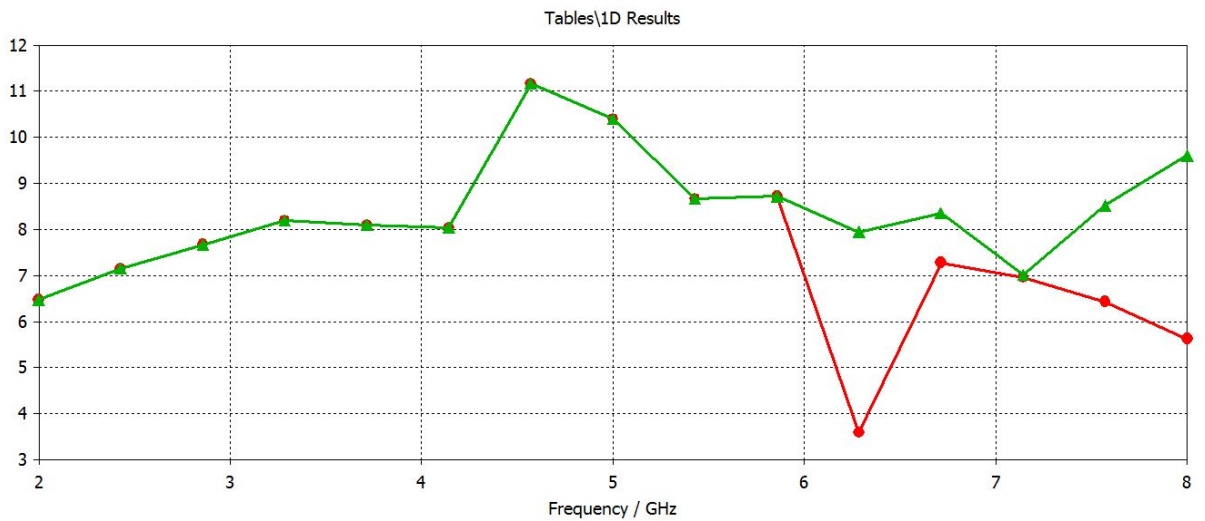


Рис. 4.2.6 Червоним кольором позначено коефіцієнт підсилення в осьовому напрямку, зеленим кольором позначено максимальний коефіцієнт підсилення антени

Аналогічно до двох-елементної решітки на вищих частотах починають виникати дифракційні явища, які призводять до того, що діаграма спрямованості роздвоюється і в осьовому напрямку коефіцієнт підсилення падає.

В підсумку можна сказати, що досліджувана антена може використовуватися, як елемент АР в діапазоні частот від 2 до 6 ГГц при умові осьового максимуму діаграми спрямованості. При цьому коефіцієнт підсилення в трьох-елементної АР коливається в межах 8... 11 дБі, що на 1,5-2 дБ більше, ніж в решітці з двома елементами.

5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Розділ має на меті проведення маркетингового аналізу стартап проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження.

5.1 Опис ідеї проекту

Опишемо ідею стартап проекту за допомогою наступної таблиці:

Таблиця 1. *Опис ідеї стартап-проекту*

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Для забезпечення роботи пристроїв, що потребують передачі інформації за допомогою бездротових технологій розроблено компактну широкосмугову смужкову антену із симетричною схемою живлення як елемент антенної решітки	Інтегрована в друковану плату антена для компактних пристроїв	Дешева технологія виготовлення, компактні габаритні розміри, застосування в широкому діапазоні частот
	Елемент антенної решітки	Системи з керованою діаграмою спрямованості та великим коефіцієнтом підсилення

В наступній таблиці порівняємо різні типи мікросмужкових антен: резонаторні, спіральні, вівальді, досліджувану антену.

Таблиця 2 . *Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту*

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Товари/концепції (потенційні) конкурентів			
		Досліджувана антена	Резонаторні антени	Спіральні антени	Вівальді антени

1.	Коефіцієнт підсилення, dBi	3...6	7...9	3...6	4...10
2.	Широкосмуговість, %	142	5...50	100...160	100...200
3.	Поляризація	Лінійна	Лінійна, колова	Колова	Лінійна
4.	Кросполяризаційне випромінювання, dB	-30	-10	-30	-30
5.	Напрямок випромінювання	Осьове	Перпендикулярно площині	Перпендикулярно площині	Осьове

Як видно з порівняльної таблиці, досліджувана антена має гірші (слабкі) значення по: коефіцієнту підсилення; аналогічні (нейтральні) значення по: широкосмуговості, кросполяризаційному випромінюванню; кращі значення (сильні) по: напрямку випромінювання. Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Для визначення технологічного аудиту заповнимо наступну таблицю:

Таблиця 3 . Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
-------	--------------	--------------------------	----------------------	------------------------

1.	Компактна широкопугова смужкова антена із симетричною схемою живлення як елемент антенної решітки	Реалізація за допомогою програмного забезпечення	Існує велика кількість цифрових процесорів, що здатні виконати аналіз поставленої задачі	Всі необхідні компоненти та ПО знаходяться у вільному доступі
2.		Реалізація за допомогою апаратного забезпечення	Дану задачу можна реалізувати за допомогою електронних компонентів з TTL логікою	Всі необхідні компоненти можна з легкістю придбати
3.		Реалізація за допомогою технології виготовлення друкованих плат	Існує велика кількість методів виготовлення друкованих, що здатні виконати поставлену задачу	Всі методи є доступними і можна замовити виготовлення
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: реалізація за допомогою програмного забезпечення, оскільки це більш зручніша і сучасніша технологія.				

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Так як досліджувана антена має велике значення широкопуговості та відноситься до мікропугкового типу антен, то попит на використання буде зосереджено в галузі конструювання компактних пристроїв з використанням бездротової технології зв'язку в двох діапазонах частот. Оскільки антени є невід'ємною частиною в при побудові бездротових мереж Інтернет, то й пристрої, що дозволяють працювати в цій мережі будуть актуальними.

Розроблена антена дозволяє швидше за своїх конкурентів інтегруватися в готовий пристрій. Тому, на мою думку, виробники компактних бездротових пристроїв обов'язково звернуть на неї увагу, а у

випадку успішної роботи перших зразків, досліджувану антену можна буде застосовувати в системах антенних решіток.

Отже, на мою думку, стартап-проект розробки компактної мікросмужкової антени з симетричною схемою живлення має хороші ринкові можливості для запуску і цілком може бути успішним, якщо прикласти зусилля для підтримки його конкурентоспроможності.

6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В даному розділі основна увага приділена питанням електробезпеки та безпеки праці при проведенні технологічного процесу пайки при виготовленні допоміжних електронних пристроїв для виконання даної роботи. Також розглянуті питання відповідності умов праці на робочих місцях існуючим санітарно-гігієнічним вимогам та питанням.

Враховуючи той факт, що в технічній частині дипломного проекту були враховані всі вимоги ГОСТ 12.1.006-84 ДСНПН№476 та ДСНПН№239 щодо зменшення негативного впливу ЕМВ радіочастотного діапазону, то дане питання в цьому розділі не розглядається.

Що стосується небезпечних та шкідливих факторів, які мають місце при використанні ПЕОМ в процесі розробки даного виробу, то в даному розділі вони також не розглядаються, оскільки в робочому приміщенні лабораторії виконуються усі вимоги ДСанПіН 3.3.2.007-98 та ДНАОП 0.00-1.31-99 щодо безпечних умов праці при використанні ПЕОМ.

Також запропоновані відповідні технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії і визначені основні заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.

6.1 Визначення основних потенційно шкідливих та небезпечних факторів при виконанні науково-дослідницької роботи

До потенційно небезпечних і шкідливих для здоров'я людини чинників, які виникають при виконанні науково-дослідницької роботи, належать:

- наявність електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону;

- можливість ураження електричним струмом;
- невідповідність параметрів мікроклімату санітарним нормам та правилам;
- наявність в повітрі робочої зони аерозоллю свинцю;
- група психофізичних факторів: перевантаження фізичне та психологічне;
- підвищений рівень шуму від працюючої витяжної системи;
- наявність інфрачервоного випромінювання;
- можливість виникнення надзвичайних ситуацій.

6.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Електробезпека.

Розроблений пристрій згідно з ГОСТ 12.2.007.0-75 відноситься до III класу за електрозахистом ($U_{живл} < 5.5В$).

Все інше електрообладнання, яке використовується в цеху, згідно з ГОСТ 12.2.007.0-75 відноситься до 0I та I класу щодо електрозахисту.

Згідно з ОНТП 24 – 86 та ПБЕ робоче приміщення по ступеню небезпечності ураження людей електричним струмом можна віднести до приміщень без підвищеної небезпеки, так як:

- відносна вологість повітря не перевищує 75% ;
- матеріал підлоги - паркет (діелектрик) ;
- температура повітря не перевищує 35°C;
- застосовані заходи по техніці безпеки, що виключають можливість одночасного доторкання людини до металоконструкцій будівлі, апаратам,

механізмам, металічним корпусам, які мають з'єднання з землею та до електропровідних елементів використовуємого електрообладнання.

В робочому приміщенні використовується 3-х фазна мережа з глухозаземленою нейтраллю і зануленням. Опір заземлення нейтралі не перевищує 3,7 Ом, що задовольняє вимогам ПУЕ та ГОСТ 12.1.030-81, оскільки для установок з напругою 1000 В заземлення повинно бути не більше 4 Ом.

6.2.1.1 Розрахунок електричної мережі на вимикаючу здатність.

В таблиці 6.2.1 приведені гранично допустимі значення напруг дотику і сили струму при аварійному режимі роботи електрообладнання напругою до 1000 В в електромережі з глухозаземленою нейтраллю при частоті 50 Гц.

Таблиця 6.2.1

Рід дії	Гранично допустимі рівні напруги і сили струму при часі дії струму, сек.											
	0,01... ...0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	>1
Змінна напруга, В	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
Змінна сила струму, мА	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36

Як засоби захисту в робочому приміщенні використовуються автомати максимального струмового захисту, із часом спрацювання $t_{спр}=0.2$ сек і номінальним струмом $I_{ном} = 5A$.

Максимальна напруга на корпусах U_k електрообладнання відносно землі при аварійному режимі його роботи, у разі однофазного короткого замикання, знаходиться за формулою:

$$U_k = U_\phi \cdot R_0 / (R_0 + R_\phi + Z_{m/3})$$

Де: U_ϕ - напруга фази, R_ϕ - опір фазного дроту, R_0 - опір нульового провoda, $Z_{m/3}$ - еквівалентний опір трансформатора.

$$U_\phi = 220 \text{ В}, R_\phi = R_0 = 1 \text{ Ом}, Z_{m/3} = 0.14 \text{ Ом}$$

Підставивши ці значення у формулу, отримуємо $U_k = 110 \text{ В}$.

Таким чином, максимальна напруга на корпусах електрообладнання при аварійному режимі його роботи не перевищує гранично допустимої напруги дотику $U_{\text{дот}} = 250 \text{ В}$ при тривалості дії $t_d = 0.2 \text{ сек}$ (ГОСТ 12.1.038-88). Величина струму короткого замикання дорівнює :

$$I_{k3} = 220 / (1 + 1 + 0.14) = 102.8 \text{ А}$$

Перевіримо виконання умови, яка характеризує надійність роботи автоматів максимального струмового захисту:

$$K = I_{k3} / I_{\text{ном}} = 102.8 / 5 = 20.56$$

Дана умова виконується, оскільки значення коефіцієнту $K > 1.4$

6.2.2 Відповідність параметрів робочого приміщення санітарним нормам

Для створення найбільш сприятливих умов ефективної і безпечної роботи в приміщенні лабораторії, необхідно забезпечити оптимальні санітарно-гігієнічні умови праці.

Висота лабораторії складає 2,85 м, довжина - 8,5 м, ширина - 6,0 м. Таким чином, площа лабораторії складає 51 м², а її об'єм - 145,35 м³. На одного працюючого в лабораторії (загальна кількість працюючих 5 чоловік) площа складає 10,2 м², а об'єм 29,07 м³, що відповідає вимогам

ДНАОП 0.00-1.31-99, згідно з яким об'єм виробничих приміщень на одного працюючого повинний складати не менш 20 м³, а площа приміщення - не менш 6 м².

У приміщенні лабораторії знаходяться тверді важко горючі речовини: деякі види пластмас, різні металеві вироби; тверді горючі речовини: усілякі дерев'яні і паперові вироби, пластмаси, гумові технічні вироби.

6.2.3 Освітлення робочих місць

Згідно вимог ДБН-В.2.5-28-2006 у робочому приміщенні, використовується система загального рівномірного освітлення. Як джерело світла використовуються люмінесцентні лампи низького тиску ЛБ80 у кількості 6 штук, розміщені в трьох світильниках Л201-2x80-02, розташовані на стелі в один ряд.

Перевіримо освітленість, забезпечену загальним рівномірним штучним освітленням. Для визначення освітленості застосуємо метод коефіцієнта використання світлового потоку:

$$E = \frac{N \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot \eta}{S \cdot K_3 \cdot Z}$$

де $N = 3$ - кількість світильників у приміщенні;

$\Phi_{\text{л}} = 7200$ Лм - світловий потік світильника;

$S = 22.5$ м² площа освітлювального приміщення;

η - коефіцієнт використання світлового потоку. Визначається в залежності від індексу приміщення і коефіцієнтів відображення: стелі $\rho_1 = 0.7$, стін $\rho_2 = 0.6$, підлоги $\rho_3 = 0.1$

$$i = \frac{S_3}{h(l+b)}$$

де: $l=5$ м довжина приміщення; $b=4.5$ м - ширина приміщення; $h=2.6$ м - висота підвісу світильників;

$$i=22.5/(2.6 \cdot (5+4.5))=1,1$$

По таблиці визначаємо $\eta = 0,5$

K_z - коефіцієнт запасу. При використанні люмінесцентних ламп у приміщеннях з повітряним середовищем, що містить менше 1 мг/м^3 пилу, $K_z = 1.5$;

$Z=1.1$ - коефіцієнт нерівномірності освітлення.

$$E=6 \cdot 9390 \cdot 0.5/(54 \cdot 1.5 \cdot 1.1)=316 \text{ Лк}$$

Норма загального освітлення робочих місць (контраст об'єкта розрізнення середній, фон середній, розряд зорової роботи 3в; робота високої точності) складає 300 Лк . Так як E фактичне більше E нормованного, то вимоги ДБН В 2.5-28-2006 виконуються.

На робочому місці монтажника комбіноване освітлення повинне забезпечити освітленість $E_{\text{норм}}=750 \text{ Лк}$. Загальне освітлення забезпечує 360 Лк , місцеве повинно бути $E_{\text{норм}}-E_{\text{заг}}=750-316=434 \text{ Лк}$. Застосуємо джерело місцевого освітлення Л 201-2x80-02.

Перевіримо, чи забезпечить даний світильник необхідну освітленість:

$$E = \frac{N \cdot n \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot L \cdot \mu \cdot \Psi}{1000 \cdot K_z}$$

де: E - освітленість, забезпечувана місцевим світильником;

N - число світильників;

$K_z=1.5$ - коефіцієнт запасу;

$n=2$ - число ламп у світильнику;

$\Phi_{\text{л}} = 3660 \text{ Лм}$ - світловий потік лампи ЛД 80

$\mu=1.2$ - коефіцієнт, що враховує збільшення освітленості від навколишніх предметів;

$L=100$ - умовна освітленість за графіком;

$\Psi=1$ - враховує кут нахилу робочої площини;

$$E = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3660 \cdot 100 \cdot 1.2 \cdot 1}{1000 \cdot 1.5} = 586 \text{ Лк}$$

Комбіноване освітлення з джерелом Л201-2x80-02 забезпечить необхідну освітленість на робочому місці монтажника.

6.2.4 Мікроклімат робочої зони

В лабораторії виконуються дослідницькі роботи з використанням обчислювальної техніки та технічної документації, а також конструкторські роботи. Виконувані роботи не вимагають систематичного значного фізичного навантаження і відносяться до легких фізичних робіт категорії Ia з енерговитратами до 120 ккал/година (ГОСТ 12.1.005-88 та ДСН 3.3.6.042-99).

Норми метеорологічних умов регламентуються ДСН 3.3.6.042-99. Значення оптимальних, припустимих і фактичних параметрів мікроклімату на постійному робочому місці розробника для категорії виконуваних їм робіт Ia в холодний і теплий період року приведені в таблиці 6.2.4.

Таблиця 6.2.4. *Нормовані значення параметрів мікроклімату в робочій зоні розробника.*

Період року	Параметри мікроклімату	Нормовані значення параметрів мікроклімату		Фактичні значення параметрів мікроклімату
		Оптимальні	Припустимі	
Холодний	Температура, °C	22-24	21-25	20-22
	Відносна	40-60	75	65-75

	вологість, %			
	Швидкість руху, м/с	не більше 0,1	не більше 0,1	не більше 0,1
Теплий	Температура, °С	23-25	22-28	22-28
	Відносна вологість, %	40-60	55, при 28 °С 75, при 22 °С	70-75
	Швидкість руху, м/с	не більше 0,1	0,1-0,2	не більше 0,2

Як бачимо, фактичні значення параметрів мікроклімату в приміщенні лабораторії в теплий і холодний період року відповідають припустимим значенням цих параметрів.

6.2.5. Розрахунок концентрації аерозолію свинцю в повітрі робочої зони.

Процес монтажу друкованих плат супроводжується забрудненням повітря в приміщенні парами аерозолію оксиду свинцю, олова та іншими елементами які входять до складу припою, а також парами різноманітних рідин, які використовуються в процесі пайки в виді флюсу та для його змиву. Знаходячись в запиленій атмосфері, робітники підпадають під дію пилу і парів, шкідливі речовини осідають на шкіряному покриву, попадають на слизисту оболонку очей, верхніх шляхів дихання, разом з слиною попадають в шлунок, вдихаються в легені. Ступінь дії аерозолів залежить від хімічного складу, який визначається хімічним складом припою.

Виходячи з об'ємів випуску, запланованого на першому етапі виробництва спроектованого виробу, процес пайки виконується вручну.

В процесі монтажу друкованих плат розробленого пристрою використовується припій ПОС – 61 ГОСТ – 21931 – 76 (61% олова, 39% свинець), флюс – розчин соснової каніфолі в етиловому спирті (50% соснової каніфолі, 50% етилового спирту), розчинник флюсу – спирт етиловий. Пайка виконується паяльником потужністю 25 Вт та напругою 36В.

Біологічна дія, клас небезпечності і ГДК домішок, які знаходяться в повітрі робочої зони при проведенні процесу пайки показано в таблиці 6.2.5.

Таблиця 6.2.5.

Компоненти	Характер дії токсичності	Клас небезпеки	ГДК в повітрі робочої зони
Свинець	При отруєнні спостерігається ураження шлунково – кишкового тракту, статевої системи, порушення вагітності	1	0,01
Олово	Ураження бронхів та легень. При довгій дії можлива пневмонія	3	10
Етиловий спирт	Має наркотичну та подразнюючу дію. При довгій дії викликає зміни в печінці, вражає серцево – судинну систему, шкіру при контакті	4	1000
Каніфоль соснова	Має подразнюючу дію, при довгому контакті викликає дерматит .	-	-

Як видно з таблиці 6.2.5 найбільш шкідливою речовиною є аерозоль свинцю. Небезпечність визначається саме токсичністю свинцю, а присутність олова лише знижує його токсичний ефект. Розрахуємо фактичну концентрацію в повітрі робочої зони аерозолу свинцю.

Концентрацію в повітрі аерозолу свинцю $C_{св}$, мг/м³, знаходимо по формулі:

$$C_{св} = 0,6 \cdot y \cdot n \cdot t \cdot N / v$$

де : $y = 0,02$ мг / 100 пайок (потужність паяльника в діапазоні 20 ... 40 Вт) ;

n – кількість пайок в хвилину, $n = 11$ (нормований час однієї пайки 4...6 сек.);

t – тривалість зміни, $t = 8$ год;

N – кількість робочих місць , на яких ведеться пайка, $N=8$ шт;

v - об'єм приміщення, $v = 280$ м³ ;

Концентрація аерозолу свинцю дорівнює:

$$C_{св} = 0,6 \cdot 0,02 \cdot 12 \cdot 8 \cdot 8 / 280 = 0,0302 \text{ мг/м}^3$$

Концентрація аерозолу свинцю в 3,02 рази перевищує ГДК, тому необхідне впровадження відповідних заходів щодо покращення умов праці.

6.2.6 Місцева вентиляція на робочих місцях монтажників

Експлуатація ділянок пайки, не обладнаних місцевою витяжною вентиляцією – заборонено .

Місцева витяжна вентиляція є найбільш ефективним та економічним засобом, що забезпечує санітарно – гігієнічні параметри повітря в робочій зоні.

Місцеві відсоси на робочих місцях монтажників повинні обслуговуватись самостійною вентиляційною установкою. Розводка

вентиляційної мережі та конструкція місцевих відсосів повинні забезпечувати регулярну очистку повітропроводів. Конструкція місцевих відсосів та зона положення всмоктуючої частини повітро приймальника вибирають в залежності від габаритних розмірів та форми виробу. В зоні ручної пайки швидкість направленою потоку, за рахунок місцевих відсосів, повинна бути на 0,2 м/с вищою ніж швидкість повітря в зоні пайки, але не меншою ніж 0,5 м/с.

Електричні паяльники в робочому стані повинні знаходитись в зоні дії місцевої витяжної вентиляції або в укритті.

На місцях пайки необхідно подавати повітря розосередженню, в верхню зону приміщення через плафони, перфорированні або щільові потоки, перфоровані повітропроводи, панелі або інші пристрої. Швидкість повітря в робочій зоні монтажника повинно бути не менше 0,3 м/с.

В приміщеннях, де розміщуються місця пайки, застосовується приточно – витяжна вентиляція. Приток повітря повинен становити 95% від всмоктуючого повітря. Інші 5 % приточного повітря надходять із суміжних, більш чистих приміщень.

В якості місцевих відсосів використовують шарнірно – телескопічні відсоси прямокутної та округлої форми з гострими краями, встановленими в вертикальній поверхні столу. Розводка вентиляційної системи місцевих відсосів в приміщенні цеху показана на рис. 6.2.6.

Кількість висмоктуваного повітря для прямокутних відсосів з гострими краями знаходиться за формулою:

$$L = (S + 7,7 \cdot E^{0,63} \cdot X^{1,4}) \cdot V_x$$

де : S – площа відсмоктуючого отвору, м² ;

E – більша сторона прямокутного відсмоктуючого отвору, $E = 0,14 \dots 0,28$ м ;

X – відстань від площини відсмоктуючого отвору до розглядаємої зони пайки, знаходиться з оптимального співвідношення між меншою стороною всмоктуючої щілини B прямокутного всмоктуючого отвору та більшою його стороною E , при котрому кількість відсмоктаного повітря буде мінімальним (знаходиться по співвідношенню $B / E = 0,24 (X / E)^{0,36}$), як правило, приймається $X = 0,1 \dots 0,3$ м;

V_x – швидкість повітря в робочому проїомі місцевого відсосу. Для ручної пайки $V_x > 0,5$ м/с .

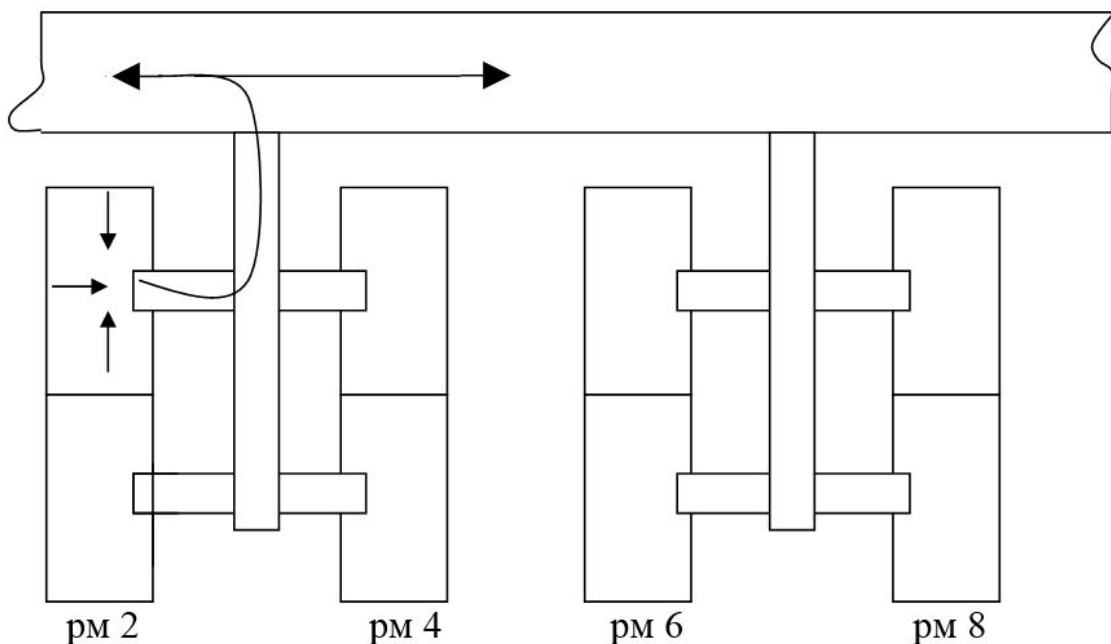


Рис.4.2.6. *Схема розміщення витяжної вентиляції.*

Горизонтальний розмір відсмоктуючого отвору необхідно вибрати більшим , ніж більша сторона друкованої плати - вибираємо $E = 270$ мм. Аналогічно треба вибрати X – більше , ніж менша сторона друкованої плати - вибираємо $X = 180$ мм. Знаходимо співвідношення :

$$B / E = 0,24 (180 / 270)^{0,36} = 0,21$$

Відповідно $V = 0,21 \cdot 0,27 = 0,056$.

Площа всмоктуючого отвору:

$$S = B \cdot E = 0,056 \cdot 0,27 = 0,015 \text{ м}^2$$

Знайдемо по формулі кількість відсмоктуваного повітря для прямокутних відсосів з гострими краями:

$$L = (0,015 + 7,7 \cdot 0,27^{0,63} \cdot 0,18^{1,4}) \cdot 0,5 = 0,16 \text{ м}^3/\text{сек} \quad (576 \text{ м}^3/\text{год})$$

Знайдемо C_ϕ з урахуванням примусової місцевої вентиляції на робочих місцях:

$$C_\phi = 0,6 \cdot y \cdot n \cdot t \cdot N / V = 0,6 \cdot y \cdot n \cdot t \cdot N / (V + L \cdot t \cdot N),$$

де: $y = 0,02 \text{ мг}/100 \text{ пайок}$;

$n = 5$ - кількість пайок за хвилину;

$t = 8 \text{ год}$ – час зміни;

$N = 2$ – кількість робочих місць;

$V = 280 \text{ м}^3$ – об'єм приміщення;

$L = 0,16$ – кількість відсмоктуваного повітря;

$N = 6$ – кількість місцевих відсосів у робочому приміщенні;

Підставимо ці значення і отримаємо;

$$C_\phi = 0,6 \cdot 0,02 \cdot 5 \cdot 8 \cdot 2 / (280 + 576 \cdot 8 \cdot 6) = 0,00023 \text{ мг}/\text{м}^3$$

Результати свідчать про те, що концентрація аерозолі свинцю не перевищує гранично допустимої концентрації згідно з вимогами існуючих нормативних документів (ГОСТ12.1.005-88).

6.2.7 Розрахунок ІЧ випромінювання на робочих місцях монтажників при проведенні процесу пайки

Проведемо розрахунок інтенсивності ІЧ випромінювання від паяльника. При паянні використовується припій ПОС-61. Його температура плавлення $190 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура паяльника повинна

бути на 40 °С більша і становить 230 °С (500 ° К). В процесі монтажу спроектованого пристрою використовується паяльник $t = 500^{\circ}$ К. Визначимо при цій температурі довжину хвилі інфрачервоного випромінювання:

$$l = 2,88 / t = 5,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Інтенсивність випромінювання знаходиться по формулі:

$$g = 0,91 \cdot S_n ((t / 100)^4 - A) / R^2$$

де : g – інтенсивність випромінювання Вт / м² ;

S_n – поверхня випромінювання , $S_n = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$;

A – допустиме значення для шкіри рук , $A = 85$;

R – відстань від точки випромінювання до рук монтажника, $R = 0,3\text{м}$;

Отримуємо: $g = 27.3 \text{ Вт} / \text{м}^2$,

Це значення задовольняє вимогам ГОСТ 12.1.005.88 та ДСН 3.3.6.042-99 (<120 Вт/ м²).

6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Одними з основних складових ПЛАС є розробка технічних рішень та організаційних заходів щодо оповіщення, евакуації та дій персоналу у разі виникнення надзвичайних ситуацій, а також визначення основних заходів з пожежної безпеки.

6.3.1 Вимоги щодо організації ефективної роботи системи оповіщення виробничого персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації

Для підвищення безпеки в надзвичайних ситуаціях (НС) пропонується встановлення системи оповіщення (СО) виробничого персоналу. Оповіщення виробничого персоналу у разі виникнення НС,

наприклад при пожежі, здійснюється відповідно до вимог НАПБ А.01.003-2009. Оповіщення про НС та управління евакуацією людей здійснюється одним з наступних способів або їх комбінацією:

- поданням звукових і (або) світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;
- трансляцією текстів про необхідність евакуації, шляхи евакуації, напрямки руху й інші дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей;
- трансляцією спеціально розроблених текстів, спрямованих на запобігання паніці й іншим явищам, що ускладнюють евакуацію;
- ввімкненням евакуаційних знаків “Вихід”;
- ввімкненням евакуаційного освітлення та світлових покажчиків напрямку евакуації;
- дистанційним відкриванням дверей евакуаційних виходів;

Як правило, СО вмикається автоматично від сигналу про пожежу, який формується системою пожежної сигналізації або системою пожежогасіння. Також з приміщення оперативного (чергового) персоналу СО (диспетчера пожежного поста) слід передбачати можливість запуску СО вручну, що забезпечує надійну роботу СО не тільки при пожежі, а і у разі виникнення будь-якої іншої НС.

Згідно з вимогами ДБН В.1.1-7-2002 необхідно забезпечити можливість прямої трансляції мовленнєвого оповіщення та керівних команд через мікрофон для оперативного реагування в разі зміни обставин або порушення нормальних умов евакуації виробничого персоналу.

Оповіщення виробничого персоналу про НС /пожежу/ здійснюється за допомогою світлових та/або звукових оповіщувачів - обладнуються всі виробничі приміщення. СО повинна розпочати трансляцію сигналу

оповіщення про НС /пожежу/, не пізніше трьох секунд з моменту отримання сигналу про НС /пожежу/.

Пульти управління СО необхідно розміщувати у приміщенні пожежного поста, диспетчерської або іншого спеціального приміщення (в разі його наявності). Ці приміщення повинні відповідати вимогам ДБН В.2.5-56-2014.

Кількість звукових та мовленнєвих оповіщувачів, їх розміщення та потужність повинні забезпечувати необхідний рівень звуку в усіх місцях постійного або тимчасового перебування виробничого персоналу.

Звукові оповіщувачі повинні комбінуватися зі світловими, які працюють у режимі спалахування, у таких випадках:

- у приміщеннях, де люди перебувають у шумозахисному спорядженні;

- у приміщеннях з рівнем шуму понад 95 дБ.

Допускається використовувати евакуаційні світлові покажчики, що автоматично вмикаються при отриманні СО командного імпульсу про початок оповіщення про НС /пожежу/ та (або) аварійному припиненні живлення робочого освітлення.

Вимоги до світлових покажчиків “Вихід” приймаються відповідно до ДБН В.2.5-28-2006 “Інженерне обладнання будинків і споруд, природне і штучне освітлення”.

СО в режимі “Тривога” повинна функціонувати протягом часу, необхідного для евакуації людей з будинку, але не менше 15 хвилин.

Вихід з ладу одного з оповіщувачів не повинен призводити до виведення з ладу ланки оповіщувачів, до якої вони під’єднанні.

Електропостачання СО здійснюється за I категорією надійності згідно з ПУЕ від двох незалежних джерел енергії: основного - від мережі

змінного струму, резервного - від акумуляторних батарей тощо. Перехід з основного джерела електропостачання на резервний та у зворотному напрямку в разі відновлення централізованого електропостачання повинен бути автоматичним. Тривалість роботи СО від резервного джерела енергії у черговому режимі має бути не менш 24 годин. Тривалість роботи СО від резервного джерела енергії у режимі “Тривога” має бути не менше 15 хвилин.

Звукові оповіщувачі повинні відповідати вимогам ДСТУ EN 54-3:2003 “Системи пожежної сигналізації. Частина 3. Оповіщувачі пожежні звукові”. Світлові оповіщувачі, які працюють у режимі спалахування, повинні бути червоного кольору, мати частоту мигтіння в межах від 0,5 Гц до 5 Гц та розташовуватись у межах прямої видимості з постійних робочих місць.

6.3.2 Обов’язки та дії персоналу в надзвичайних ситуаціях

У разі виявлення ознак НС працівник, який їх помітив, повинен:

- негайно повідомити про це засобами зв’язку органи ДСНС та Державну пожежну охорону, вказати при цьому адресу кількість поверхів, місце виникнення НС, наявність людей, а також своє прізвище;
- повідомити про НС керівника, адміністрацію, пожежну охорону підприємства;
- організувати оповіщення людей про НС;
- вжити заходів щодо евакуації людей та матеріальних цінностей;
- вжити заходів щодо ліквідації наслідків НС з використанням наявних засобів.

Керівник та пожежна охорона установи, яким повідомлено про виникнення пожежі, повинні :

- перевірити, чи викликано підрозділи ДСНС та Державна пожежна охорона;
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;
- у разі загрози життю людей негайно організувати їх евакуацію та

їх

рятування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації НС;

- перевірити здійснення оповіщення людей про НС;

– забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які беруть участь у ліквідації НС;

– організувати зустріч підрозділів ДСНС та Державної пожежної охорони, надати їм допомогу у локалізації та ліквідації пожежі. Після прибуття підрозділів ДСНС та Державної пожежної охорони повинен бути забезпечений безперешкодний доступ їх до місця, де виникла пожежа.

6.3.3 Пожежна безпека

Приміщення, у яких передбачається виготовляти розроблений пристрій, відповідають категорії В по вибухопожежонебезпечності згідно ОНТП 24-86 та НАПБ Б.03.002-2007.

Клас робочих зон приміщень по пожежонебезпечності класифікується згідно ДНАОП 0.00-1.32-01 та ПБЕ як П-ІА, тому що присутні тверді і волокнисті горючі матеріали без виділення пилу і волокон.

Кількість, розташування та умови зберігання вогнегасників в робочому приміщенні повинні відповідати вимогам ДСТУ 3675-98 та ISO 3941 – 77.

Склад горючих, важко горючих і негорючих матеріалів, що застосовуються у розробленому пристрої, приведені в табл.6.3.3.

Таблиця 6.3.3

Матеріал	Займистість	Температура займання, °С	Теплостійкість	Характер полум'я
Полістирол	Горючий	274	65	Коптить
Поліетилен	Горючий	306	70	Бездимний
Поліхлорвініл	Горючий	560	65	Коптить
Гума	Горючий	220	50	Коптить
Текстоліт	Важкозаймистий	358	120	Самозагас.
Лакоткань	Важкозаймистий	430	205	Самозагас.

Перелік потенційних причин загоряння в проектованому пристрої:

- коротке замикання;
- перевантаження електро радіо компонентів (ЕРЕ), доріжок друкованих плат, монтажних проводів, блоку живлення;
- виділення тепла в контактах;

Серед можливих причин займання в проектованому пристрої можна виділити наступні:

- займання ізоляційних матеріалів внаслідок підвищення температури провідника в місці з'єднання через поганий контакт, старіння

і розтріскування ізоляції, протікання струмів за значеннями більше розрахункових;

- електричний пробій діелектриків, перемикачів, роз'ємів;
- займання ЕРЕ внаслідок перевищення виділяємої на них потужності;
- руйнування електролітичних конденсаторів внаслідок старіння;

Для запобігання займання нормальна температура всередині корпусу забезпечується за рахунок примусового охолодження, відповідного вибору ЕРЕ по припустимій потужності розсіювання, вибору ширини доріжок друкованих плат і діаметру монтажних проводів згідно припустимій щільності струму.

У приміщенні, у якому здійснюється монтаж друкованих плат і збирання виробу, згідно вимог ДБН В 2.5-56-2014 передбачається електрична пожежна сигналізація (п'ять випромінювачів типу СПД - 1) для швидкого повідомлення служби пожежогасіння про виникнення пожежі. Передбачається також проведення протипожежного інструктажу, занять і бесід з робітниками та обслуговуючим персоналом. Згідно з вимогами ДСТУ 3675-98 та ISO 3941-47 в робочому приміщенні використовуються два ручних вуглецевих вогнегасника типу ОПС-6 (ОПС-10), для гасіння електроустановок з робочою напругою до 1000 В. Вхід у приміщення, проходи між робочими столами і коридори не дозволяється захарашувати різними предметами й устаткуванням. Для збереження всіх речовин і матеріалів передбачаємо спеціальні шафи і ємності.

Максимальна віддаленість робочих місць від евакуаційних виходів, мінімальний час евакуації, ширина евакуаційних виходів та проходів відповідають вимогам ДБНВ.1.1-7-2002.

В цілому у робочому приміщенні виконані всі вимоги щодо пожежної безпеки згідно НАПБ А.01.001-2004 “Правил пожежної безпеки в Україні”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Подторжнов О.М., Воробьева З.М.. Печатные полосковые антенны (Патенты США, Англии, Франции, ФРГ, Японии). Обзоры по электронной технике. Серия: «Электроника СВЧ», вып. 8(902). — М.: ЦНИИ «Электроника», 1982, 54 с.;
2. Garg R. Microstrip antenna design handbook. – (Artech House antennas and propagation library). 2001 ARTECH HOUSE, INC.
3. Веселов Г.И., Егоров Е.Н., Алехин Ю.Н. и др. Микроэлектронные устройства СВЧ. Учеб. пособие для радиотехнических специальностей ВУЗов. — М.: Высш. шк., 1988, 280 с.; 5. Проектирование полосковых устройств. Учебное пособие, Ульяновский государственный
4. Kin-Lu Wong Compact and Broadband Microstrip Antennas. – Copyright 2002 by John Wiley & Sons, Inc., New York.
5. Антенны и устройства СВЧ (проектирование фазированных антенных решеток) под ред. Д. И. Воскресенского, Радио и связь 1994 г.
6. Garg R. Microstrip antenna design handbook. – (Artech House antennas and propagation library). 2001 ARTECH HOUSE, INC.

7. Ротхаммель К., Антенны. – (Пер. с нем. Т.Э.Кренкель) издательство “Энергия” Москва, 1966, 272 стр.
8. Курушин А.А., Пластиков А.Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. – М. Издательство МЭИ, 2010, 160 стр.
9. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. – Высшая школа 1988 г.
10. Data Sheet Thermoset Microwave Materials [Electronic Resource] // Офіційний сайт компанії виробника. – Mode of access: <http://www.rogerscorp.com/>
11. Mehdipour A., K. Mohammadpour-Aghdam, and R. Faraji-Dana, “Complete dispersion analysis of Vivaldi antenna for ultra-wideband applications” Progress In Electromagnetics Research, Vol. 77, 85-96, 2007.
12. Yang, Y., Y. Wang, and A. E. Fathy, “Design of compact Vivaldi antenna arrays for UWB see through wall applications,” Progress In Electromagnetics Research, Vol. 82, 401-418, 2008.
13. Корбанский И. Н. Антенны. – М.: Энергия, 1973.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеної роботи зроблено такі висновки:

1. Проведено огляд принципів побудови та існуючих зразків мікросмужкових антен та обрано прототип у вигляді антени з експоненційним розкритом із живленням компланарною мікросмужковою лінією.

2. Розраховано і налаштовано одиничний випромінювач. Розглянуто вплив зміни геометричних параметрів на електродинамічні характеристики випромінювача.

3. Оптимізовано параметри одиничного випромінювача. Отримано значення КСХН (не більше 2) в смузі робочих частот (2 - 8 ГГц).

4. По отриманим теоретичним результатам аналізу було виготовлено прототип антени з необхідними елементами живлення та перевірено розрахункові дані.

5. Отриманий виріб можна застосовувати як антену для компактних бездротових пристроїв, або як елемент антенної решітки.

ДОДАТОК А. ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

Студентський науковий семінар “Наукові розробки РТФ’2018”

ШИРОКОСМУГОВА МІКРОСМУЖКОВА АНТЕНА

Автор Деружко Б. М.

(науковий керівник – PhD, асист. Сушко О. Ю.)

Актуальною задачею на сьогодні є розробка нових компактних дводіапазонних антен для мініатюрних радіоприймачів, компактних мобільних телефонів і GPS навігаторів, автомобільних систем безпеки, тощо. Головним складовим елементом цих систем можуть бути мікросмужкові антени, які широко використовуються в сучасній науці і техніці. Головними перевагами мікросмужкових антен є легкість виготовлення, низька ціна, легкість і компактність конструкції, що є одним із важливих факторів в авіабудуванні.

Вперше поняття мікросмужкового випромінювача було запропоноване Дешампсом в 1953 році [1], а запатентоване у Франції на ім'я Гуттон і Байзіннот [1]. Дослідження, що тривали впродовж 1970-х років, були прискорені вже отриманими діелектричними матеріалами з малими втратами і задовільними температурними і механічними властивостями, покращеною технологією фотолітографії і кращими теоретичними моделями. Перша мікросмужкова антена була розроблена Ховеллом і Мансоном [1]. З того часу, почалося інтенсивне вивчення і розробка мікросмужкових антен і систем, пов'язане із використанням їх численних переваг.

На рисунку 1 показана досліджувана в даній роботі конструкція мікросмужкової антени. Вона складається з випромінюючої частини, що розташована з одного боку діелектричної підкладки ($\epsilon_r = 4$) і металевій площини заземлення з іншої. Металева частина мікросмужкового випромінювача, зазвичай, золота або мідна, може приймати практично будь-яку геометричну форму. Втім найчастіше використовуються правильні форми з міркувань спрощення електродинамічного аналізу і передбачення характеристик, наприклад прямокутна, лінійний або експоненційний розкрит.

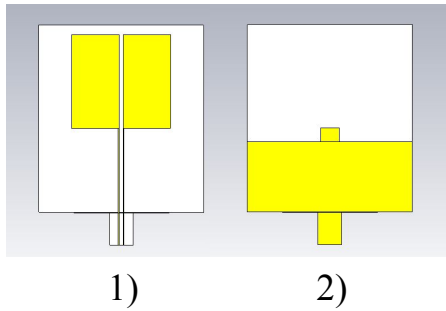


Рисунок 1. Конфігурація мікросмужкової антени: вид спереду — 1, вид ззаду — 2

Значення відносної діелектричної проникності підкладки антени ϵ_r може варіюватись в досить широкому діапазоні частот від 1.2 до 10 і вище. Проте, для зменшення випромінювання ліній живлення, рекомендовано використовувати матеріали, у яких значення відносної діелектричної проникності речовини повинні бути більшими, наприклад $\epsilon_r = 10$. На сьогоднішній день, існує багато видів матеріалів з різними значеннями діелектричної проникності і малими значеннями тангенса кута втрат. Деякі з цих речовин є гнучкими, тобто придатними для створення конформних антени [3]. В даній роботі були досліджені характеристики мікросмужкової антени, емпіричним шляхом підібрані оптимальні значення та необхідні параметри. Основні характеристики: смуга робочих частот 2–6 ГГц, коефіцієнт підсилення 3 дБі, узодження по входу КСХН < 2,5 (Рис. 2).

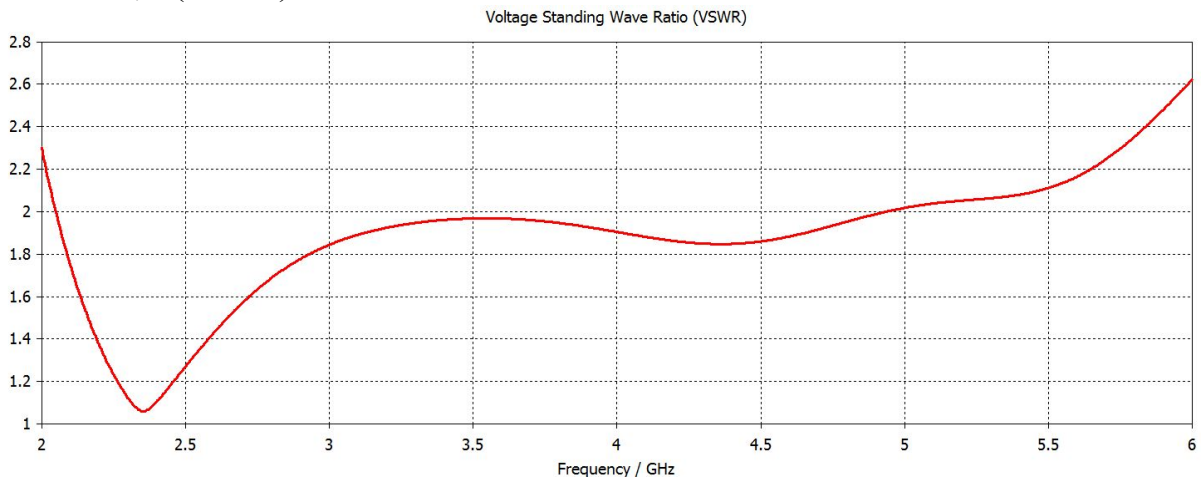


Рисунок 2. Розраховані значення КСХН моделі антени

Діаграму спрямованості (Рис. 3) було отримано з міркувань того, що дана антена має бути всеспрямованою в площині, перпендикулярній власній площині антени, проте також вдалося отримати два виражені максимуми підсилення в напрямку лінії, що перпендикулярна до площини антени (коефіцієнт підсилення становить 3 дБі). Ширина головного пелюстка по рівню -3 дБ становить 78 градусів.

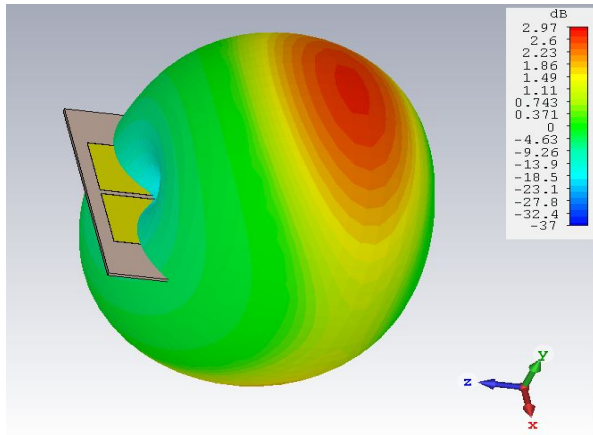


Рисунок 3. Діаграма спрямованості досліджуваної антени на частоті 2,4 ГГц

Отримані характеристики, при лінійних розмірах антени 35x40x0,5 мм, дають великі можливості для застосування в різних пристроях та сферах діяльності. Прикладом застосування може бути компактний wi-fi роутер, антена системи керування БПЛА, антени мережі датчиків по збору інформації про стан споживання електроенергії, або газу в приватних постачальників.

Перелік посилань

1. Garg R. Microstrip antenna design handbook. – (Artech House antennas and propagation library). 2001 ARTECH HOUSE, INC.
2. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. Микрополосковые антенны. – М.: Радио и связь, 1986. – 144ст., ил.
3. J. R. James & P. S. Hall Handbook of Microstrip Antennas. – 1989: Peter Peregrinus Ltd.

Анотація

Досліджено компактну ширококутну мікросмушкову антену для діапазону частот 2–6 ГГц. Отримані результати дають можливість застосовувати таку антену в компактних радіотехнічних пристроях з можливістю працювати в двох діапазонах одночасно. Ключові слова: мікросмушкова антена, ширококутність.

Abstract

The compact broadband microstrip antenna with operating frequency range of 2-6 GHz. The obtained results allow the use of such an antenna in compact radio devices with the ability to work in two bands simultaneously.

Keywords: microstrip antenna, wideband