

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра радіотехніки

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Широкосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM»

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-20м
спеціальності 172 – Телекомунікації
та радіотехніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Шмата В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., ст.викл. каф. РТ

Притула М.О.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2021 р.

Опонент: к.т.н., професор каф. ТКСТБ

Барась С.Т.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2021 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри РТ

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2021 р.

Вінниця ВНТУ - 2021 рік

Вінницький національний технічний університет
 Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
 Кафедра радіотехніки
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
 Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації
 Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка
 Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри РТ
 д.т.н., проф. Осадчук О.В.

_____ 2021 року

З А В Д А Н Н Я **НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

_____ Шматі Віктору Сергійовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Широкосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM
 керівник роботи д.т.н., проф., проєктор кафедри РТ Семенов А.О. _____
 затверджені наказом вищого навчального закладу від “__” _____ 202_ року
 № _____
2. Строк подання студентом роботи _____ 2021 року
3. Вихідні дані до роботи: діапазон частот GSM-900 (890-915 МГц і 935-960 МГц), GSM-1800 (1710-1785 МГц і 1805-1880 МГц); Коефіцієнт стоячої хвилі у фідері $\leq 2,5$; Коефіцієнт корисної дії не менше 50%; Коефіцієнт спрямованої дії не більше 3; Амплітудна діаграма спрямованості - кругова; Поляризація електромагнітних хвиль – лінійна; Пікова потужність випромінювання - 23 дБм.
4. Зміст текстової частини: Аналіз сучасного стану розробки широкосмугованих друкованих антен; елементи теорії друкованих антен; комп'ютерне проектування та оптимізація широкосмугової друкованої GSM антени; результати експериментальних досліджень широкосмугової друкованої антени; економічна частина; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; висновки; перелік посилань; додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Конструкція друкованої антени; Ескіз друкованої антени; Комп'ютерне проектування друкованої антени; Дослідження енергетичних властивостей друкованої антени; Моделювання спрямованих характеристик друкованої антени; Фото експериментального зразка друкованої антени; Експериментальне дослідження друкованої антени; Результати експериментальних досліджень друкованої антени.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	к.т.н., ст. викл. Притула М.О.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Професор кафедри БЖДПБ, доцент, д.п.н., Дембіцька С.В.		
Економічна частина	доцент. каф. ЕПВМ к.е.н., Кавецький В.В.		

7. Дата видачі завдання _____ 2021 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	03.09.2021-14.09.2021	
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	15.09.2021-21.09.2021	
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	21.09.2021-25.09.2021	
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	26.09.2021-09.10.2021	
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	10.10.2021-03.11.2021	
6.	Розділ моделювання	04.11.2021-12.11.2021	
7.	Розробка графічної частини МКР	13.11.2021-18.11.2021	
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	19.11.2021-24.11.2021	
9.	Охорона праці (ОП)	25.11.2021-30.11.2021	
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.12.2021-08.12.2021	
11.	Нормоконтроль	09.12.2021-12.12.2021	
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	13.12.2021-19.12.2021	
13.	Захист МКР ЕК	21.12.2021-23.12.2021	

Студент

_____ (підпис)

Шмата В.С.

Керівник роботи

_____ (підпис)

Притула М.О.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Шмата В. С. Ширококуткова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма - радіотехніка. Вінниця: ВНТУ, 2021. 180 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 108 назв; рис.: 59; табл. 17.

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено ширококуткову друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM. Вона дозволяє покращити електромагнітну сумісність носимих на руці абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM і спростити їх конструктивне виконання. Антена буде виконана всередині гнучкого браслету.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено аналіз сучасного стану гнучких друкованих антен. Наведено елементи теорії друкованих антен. Проведено розрахунок електричних і параметрів гнучкої ширококуткової друкованої антени. Здійснено комп'ютерне конструкторське проектування та моделювання її характеристик. Виконано дослідний зразок антени та отримано результати її експериментальних досліджень.

Графічна частина складається з 8 плакатів із результатами модельних та експериментальних досліджень.

Також у магістерській кваліфікаційній роботі проведено розрахунки економічної частини та розділу охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: гнучка друкована антена, широка смуга частот, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт стоячої хвилі, діаграма спрямованості.

ABSTRACT

Shmata V.S. Broadband printed antenna with increased efficiency for subscriber devices of telecommunication networks of the GSM standard. Master's qualification work in specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - radio engineering. Vinnytsia: VNTU, 2021. 180 p.

In Ukrainian language. Figs.: 108. Tables: 59. Refs.: 17 titles.

In the master's degree work, a broadband printed antenna with an increased efficiency was developed for subscriber devices of telecommunication networks of the GSM standard. It improves the electromagnetic compatibility of hand-held subscriber devices of telecommunication networks of the GSM standard and simplifies their design. The antenna will be made inside a flexible bracelet.

In the master's qualification work, an analysis of the current state of flexible printed antennas is carried out. The elements of the theory of printed antennas are presented. The calculation of the electrical and parameters of a flexible broadband printed antenna has been made. Computer design and modeling of its characteristics have been carried out. A prototype of the antenna was made and the results of its experimental studies were obtained.

The graphic part consists of 8 posters with the results of model and experimental studies.

Also in the master's qualification work, calculations were made of the economic part and the section of labor protection and safety in emergency situations.

Keywords: flexible printed antenna, wide bandwidth, efficiency, standing wave ratio, radiation pattern.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗРОБКИ ШИРОКО- СМУГОВАНИХ ДРУКОВАНИХ АНТЕН	11
1.1. Застосування широкосмугових друкованих антен в сучасних інфокомунікаційних системах	11
1.2 Матеріали для гнучких друкованих антен.....	14
1.3 Методи виготовлення гнучких друкованих антен.....	23
1.4 Застосування гнучких друкованих антен у різних діапазонах частот.....	34
1.5 Мініатюризація гнучкої друкованої антени	40
1.6 Гнучкі друковані антени для медичних імплантів	43
1.7 Гнучкі друковані антени для програми, що змінюється.....	45
1.8 Характеристики різних типів гнучких друкованих антен	48
1.9 Переваги та недоліки гнучких друкованих антен.....	55
1.10 Висновки до розділу	57
2 ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ДРУКОВАНИХ АНТЕН	59
2.1 Призначення та принцип дії друкованих антен	59
2.2 Параметри та характеристики передавальних і приймальних антен	60
2.3 Параметри та характеристики друкованих вібраторних антен	70
2.4 Спрямовані властивості друкованих багатовібраторних антен	82
3 КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ШИРОКОСМУГОВОЇ ДРУКОВАНОЇ GSM АНТЕНИ	89
3.1 Розрахунок електричних параметрів широкосмугової друкованої антени	89
3.2 Комп'ютерне проектування широкосмугової друкованої антени в пакеті програм ANSYS HFSS.....	96
3.3 Моделювання спрямованих характеристик широкосмугової друкованої антени в пакеті програм ANSYS HFSS.....	99

3.4 Дослідження енергетичних властивостей широкосмугової друкованої антени в пакеті програм ANSYS HFSS.....	102
3.5 Моделювання спрямованих характеристик широкосмугової друкованої антени у зігнутому положенні	104
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ШИРОСМУГОВОЇ ДРУКОВАНОЇ АНТЕНИ.....	106
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	110
5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки	110
5.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки	114
5.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	117
5.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором	129
5.5 Висновки до розділу	133
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	135
6.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт	136
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	139
6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Визначення області працездатності абонентського пристрою телекомунікаційних мереж в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	144
ВИСНОВКИ	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	151
Додаток А (обов'язковий). Технічне завдання	163
Додаток Б (обов'язковий). Конструкція широкосмугової друкованої антени	169
Додаток В (обов'язковий). Ескіз широкосмугової друкованої антени	171
Додаток Д (обов'язковий). Комп'ютерне проектування широкосмугової друкованої антени в пакеті програм ANSYS HFSS.....	173

Додаток Е (обов'язковий). Дослідження енергетичних властивостей антени	175
Додаток Ж (обов'язковий). Моделювання спрямованих характеристик ширококугової друкованої антени у зігнутому положенні	177
Додаток И (обов'язковий). Фото експериментального зразка гнучкої ширококугової друкованої антени	179
Додаток К (обов'язковий). Експериментальне дослідження гнучкої ширококугової друкованої антени	181
Додаток Л (обов'язковий). Результати експериментальних досліджень ширококугової друкованої антени	183

ВСТУП

Актуальність теми.

Одним із найважливіших завдань, що виникають при проектуванні ширококутних антен стільникових телефонів, є розробка форми антени, яка б вдало вписувалася в корпус стільникового телефону, забезпечуючи при цьому необхідний коефіцієнт посилення. Жорсткі вимоги пред'являються і до форми ДН стільникового телефону. Вона повинна забезпечувати стійкий прийом з будь-якого ракурсу в умовах міської забудови, а також задовольняти вимогам безпеки при використанні стільникового телефону. Як правило, остання вимога до форми ДН забезпечується застосуванням відбиваючих, які суттєво впливають на узгодження в робочій смузі частот [1, 2].

Розширення функціональних можливостей стільникового телефону призводить до необхідності збільшення числа робочих діапазонів частот. При цьому ускладнюється конструкція і використовуються багатошарові друковані структури. Моделювання таких структур доцільно проводити за допомогою програмних продуктів, які застосовуються для розрахунку двовимірних і тривимірних антен і пристроїв НВЧ. Системне моделювання складної багатошарової структури дозволяє провести оптимізацію параметрів та чисельний експеримент, що виключає в ряді випадків необхідність проведення натурального експерименту [3, 4].

Аналіз останніх досліджень.

В даний час існують різні методи розрахунку ширококутних антен. Однак більша частина цих методів не дозволяє провести оцінку характеристик спрямованості ширококутних або багатодіапазонних антен через математичної складності. Найбільш простим рішенням поставленого завдання є математичне та чисельне електродинамічне моделювання. Однак для формування і аналізу складних структур потрібні значні комп'ютерні ресурси і час [5, 6].

Тому виникає необхідність розробки наближених методик розрахунку, які можна застосувати для широкого класу антен і дозволяють при мінімальних ча-

сових витратах і з достатнім ступенем точності оцінити основні характеристики [7, 8].

Для аналізу широкосмугових антен біжучої хвилі, а також деяких антен на основі взаємодоповнюючих структур, зручно використовувати теорію неоднорідних ліній. В даний час розроблена теорія неоднорідною експоненційної лінії з хвилею, що біжить, що дозволяє шляхом нескладних перетворень, визначити різні режими роботи еквівалентної неоднорідною лінії передачі, що моделює антену [9].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота проводилася згідно з напрямками дослідження в рамках прикладних держбюджетних науково-дослідних робіт 32-Д-400 «Методи та пристрої формування й оброблення хаотичних сигналів, контролю доступу та позиціонування у робототехнічних та інфокомуні-каційних системах» (номер державної реєстрації 0121U109722), а також у відповідності із тематичним планом «32К3. Елементи і пристрої радіоелектронних та інформаційно-вимірювальних систем» наукових досліджень по кафедрі радіотехніки Вінницького національного технічного університету на 2020-2022 календарні роки.

Метою роботи є розробка та дослідження широкосмугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM.

Задачами досліджень магістерської кваліфікаційної роботи є:

- провести аналіз сучасного стану розробки широкосмугових друкованих антен з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM;
- провести літературний огляд теоретичних основ побудови широкосмугових друкованих антен;
- розробити варіанти широкосмугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM;

- здійснити дослідження спрямованих властивостей та частотних характеристик ширококугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM;
- дослідити вплив виду та форми ширококугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM на її імідансні характеристики.

Об'єктом дослідження є процеси прямого та зворотного перетворення енергії електромагнітних радіохвиль в електричний сигнал у ширококуговій друкованій антені з підвищеним коефіцієнтом корисної дії.

Предметом дослідження є просторі та частотні параметри і характеристики ширококугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії.

Наукова новизна одержаних результатів – отримав подальший розвиток метод побудови ширококугових друкованої антен з підвищеним коефіцієнтом корисної дії.

Практична новизна одержаних результатів – полягає в отриманих нових конструкцій і результатів експериментальних і модельних досліджень ширококугових друкованих антен з підвищеним коефіцієнтом корисної дії.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідалися та обговорювалися на VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2021)» (м. Вінниця, 03–05 листопада 2021 року) [10].

Публікації результатів наукових досліджень. За темою досліджень автором опубліковано 1 статтю у збірнику матеріалів VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2021)» (м. Вінниця, 03–05 листопада 2021 року) [10].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗРОБКИ ШИРОКОСМУГОВАНИХ ДРУКОВАНИХ АНТЕН

1.1. Застосування широкосмугових друкованих антен в сучасних інфокомунікаційних системах

Доступність мережі 5G з високою швидкістю, великою пропускною здатністю та малою затримкою дозволила "Четверта промислова революція" [11]. Кожен сектор отримає вигоду від мереж 5G від 3-D візуалізація, передова охорона здоров'я, потокові послуги та розумні міста, і це лише деякі з них [12]. Далі, сильне Мережа 5G потрібна для правильного функціонування пристроїв Інтернету речей (IoT) [13,14]. Візуальне Подання взаємозв'язку між об'єктами Інтернету речей та мережею 5G показано на рисунку 1.1 [2].

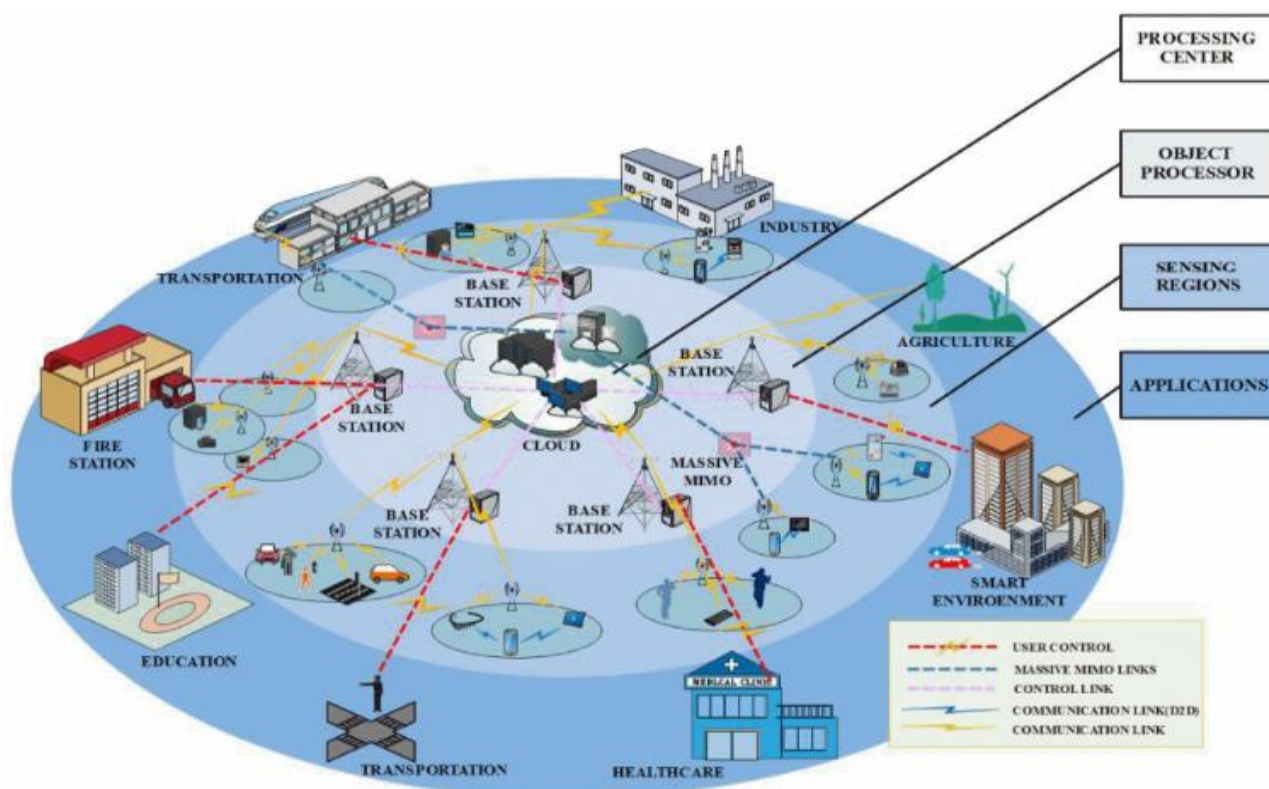


Рисунок 1.1 – Архітектура з'єднання між 5G та Інтернетом речей (IoT) [15]

Один із найважливіших бар'єрів на шляху технічного прогресу пристроїв, пов'язаних з Інтернетом речей наступного покоління негнучкість впливає з міркувань форм-фактора та ваги. Хоча були на кілька порядків прогресу в мініатюризації, гнучкість – це особливість, яку важко подолати. Останні інновації в галузі інженерних матеріалів були використані для розширення галузі гнучкості електроніки. Гнучкі електронні пристрої часто легкі, портативні, менш дорогі, екологічно чисті. Лружні та одноразові [16]. Очікується, що виторг ринку гнучкої електроніки досягне 40,37 мільярда доларів. до 2023 [17,18]. На рисунку 1.2 показані різноманітні застосування гнучких електронних пристроїв. Гнучка електроніка системи вимагають інтеграції гнучких антен, що працюють у певних діапазонах частот, щоб забезпечити бездротовий зв'язок, який необхідний у сучасному інформаційному суспільстві [2].

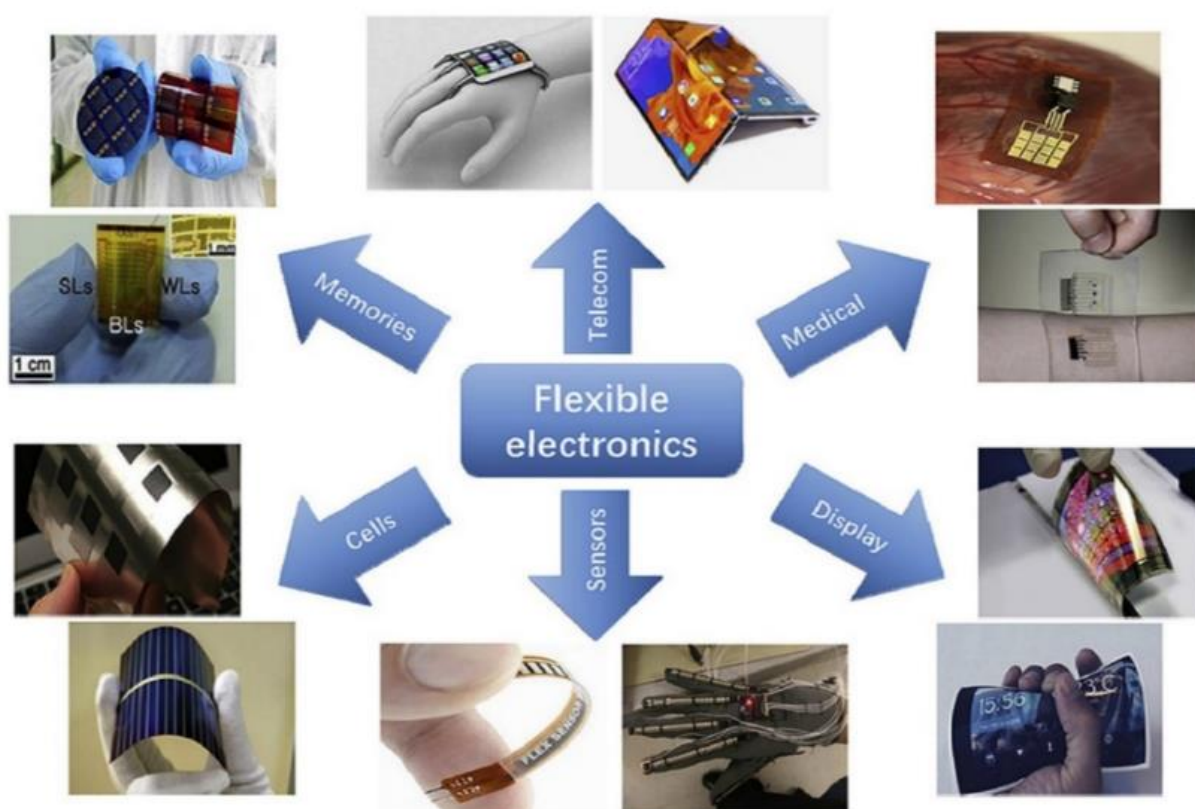


Рисунок 1.2 – Области застосування гнучкої електроніки [19]

Ринки гнучких бездротових пристроїв швидко зростають, частково через попит. У пристроях, що носяться та імплантуються, для систем моніторингу здоров'я та повсякденних бездротових пристроях. Наприклад, стільникові теле-

фони, портативні комп'ютери тощо. З цієї причини потреба у гнучких друкованих антенах збільшилося останніми роками, особливо для біомедичних додатків [20,21]. Зокрема, гнучкі антени є важливим компонентом у реалізації моніторингу життєво важливих функцій *in vivo*, регуляції органів функції, нейронні інтерфейси, безперервний аналіз ходи, внутрішньочерепні датчики, системи доставки ліків, і безліч інших функцій [22, 23]. Для інтеграції пристроїв у людське тіло, що характеризується криволінійною поверхністю або навіть розтягується. Оскільки жорсткість тонкоплівкової структури на вигин, що характеризує її опір деформації вигину приблизно залежить від кубічної товщини потонання. Товщина конструкції є ефективним засобом для забезпечення гнучкості / згинання антен. Крім біомедичних додатків, є спільні інтереси між федеральними агентствами, промисловістю, та наукові кола у розробці гнучкої антени для екстремальних умов. Заявки федеральних відомств. До гнучких високотемпературних пристроїв відносяться: новий ядерний реактор із газовим охолодженням (високотемпературний, монітори безпеки H₂) та суворі вимоги до контролю автомобільних викидів (датчики вихлопної труби) від міністерства енергетики (DOE); потреба в гнучких антенах та антенних обтічниках з екстремальни термостійкість для ракетних додатків та високотемпературні підкладки для гіперзвукових антен для Міністерства оборони (DoD); комунікаційне рішення для роботи поза зоною прямої видимості зв'язок по малих та середніх безпілотних літаючаих апаратах (БПЛА) для національних Управління з авіації та дослідження космічного простору (НАСА); та бездротове фізіологічне та екологічна системна вимога моніторингу (WiPEM) (для служб швидкого реагування) від Міністерства внутрішніх справ безпеки (DHS) [2].

Повідомляється про кілька недавніх досліджень, у яких дається широкий огляд матеріалів, виготовлення, та застосування різних гнучких та носимих антен [24–29]. Практичний посібник з проектування про виробництво як нетканних, так і повністю текстильних антен, що носилися, повідомлялося в [14]. В іншій статті [25] основна увага приділялася різним технологіям виготовлення гнучких антен уздовж з розробкою та аналізом друкованої монопольної антени.

Повний огляд нещодавно використаних матеріалів і методи виготовлення антен, що носяться, від дуже високих частот (VHF) до мм діапазон був представлений раніше [26]. В іншій статті [27] основний фокус огляду був присвячений матеріалам і технологіям виготовлення тільки конструкцій антен, що носяться з їх додатками, обмеження та рішення. Нещодавній прогрес в області надширококутових антен і їх застосування у системах бездротової телемережі (WBAN) було продемонстровано раніше вивчення [28]. Різні типи імплантованих антен, вимоги до їх конструкції та характеристик порівняння було розглянуто у попередній статті [29]. Унікальність цієї статті полягає в тому, що ця стаття полягає в тому, що ми покриваємо всю площу гнучкої антени, а не зосереджуємось на підмножині, наприклад пристрої, що носяться. Далі автори обговорюють застосування антен, що охоплюють широкий діапазон частот. Діапазони на відміну інших статей, обмежують обсяг робочої частоти. Крім того, оригінальна стаття присвячена дослідженням за останні 5 років [2].

У будь-якому бездротовому додатку вибір та конструкція антени різняться залежно від навколишнього середовища, потужність передачі та частотний діапазон [30]. Далі працездатність антени залежить від використовуваного матеріалу, типу використовуваної технології виготовлення та властивостей підкладки. У цьому контексті у статті розглядається напрям досліджень використовуваних провідних матеріалів, підкладок, різні методи виготовлення гнучкої антени та їх різноманітні застосування. Крім того, виділено проблеми у дослідженнях гнучких антен та майбутні напрямки [2].

1.2 Матеріали для гнучких друкованих антен

Гнучкі антени виготовляються з використанням різних провідних матеріалів та підкладок. Підкладка вибирається виходячи з їх діелектричних властивостей, стійкості до механічних деформацій (вигин, скручування та загортання), схильності до мініатюризації та витривалості у зовнішньому середовищі.

Навпаки, вибір провідного матеріалу (на основі електропровідності) вимагає, щоб антена продуктивність, наприклад, ефективність випромінювання [2].

1.2.1 Провідні матеріали

У бездротових додатках реалізація провідних малюнків із чудовою електропровідністю. необхідний для забезпечення високого коефіцієнта посилення, ефективності та пропускну здатності. Додатково стійкість до деградації через механічну деформацію - ще одна бажана характеристика провідного матеріалу. Наночастки (NP) чорнило (тобто срібло та мідь) часто переважні для виготовлення гнучких антен через їх високу електричну провідність. Фарби чорнила з наночастинками срібла над наночастинками міді через їх низьку швидкість утворення оксидів [31]. Було проведено дуже мало досліджень гнучких антен на основі наночастки на основі міді [32]. Крім наночастинок, електротекстильні матеріали, такі як покриття Ni/Ag, Зазвичай використовуються Flectron (нейлонова тканина з мідним покриттям) та неткані провідні тканини (NWCF) у гнучких антенах. Різні типи текстильних та нетекстильних провідних матеріалів для розробки гнучкі антени були розглянуті у більш ранній статті [34]. Клейка мідь [34], мідні стрічки [33], та мідна оболонка [34] повідомлялося при розробці гнучких антен [2].

На рисунку 1.3 представлені зображення антен, виготовлених з різних струмопровідних матеріалів. Провідні полімери, такі як поліанілін (PANI) [25], поліпіррол (PPy) [36] та полі (3,4 етилендіокситіофен) полістиролсульфонат (PEDOT: PSS) [37] здаються багатообіцяючими матеріалами для гнучких і антен, що носяться. Низька провідність провідних полімерів була покращена за рахунок додавання вуглецевих нанотрубок [38], графену [39] та вуглецевих наночастинок [30] (рис. 1.3). Гнучкі антени, що використовують графен, перспективні через їхню пристойну електропровідність і відмінну механічну властивість. Графеновий папір [41], графенове нанолускате чорнило [42,43], чорнило на основі оксиду графену [44], і чорнило з наночастинками графену [45] використовувалися у попередніх дослідженнях для виготовлення гнучких антен.

Характеристики гнучких антен значною мірою залежать від виготовлених струмопровідних доріжок з високою стійкістю до деформації за збереження електропровідності [46]. Для розміщення механічних деформацій та деформація без погіршення характеристик антен, різних розтяжних провідні матеріали використовують легування для покращення своєї провідності. Деякі приклади включають силікон [47], що містить срібні нанодропи, фторкаучук, що містить срібло [48], вуглецеві нанотрубки. Провідні полімери на основі (УНТ) [38,49], рідкі метали в підкладці, що розтягуються [50] і використання самої еластичної тканини [41]. У таблиці 1.1 перераховані різні провідні матеріали, що використовуються під час виготовлення гнучких антен разом зі значенням провідності [2].

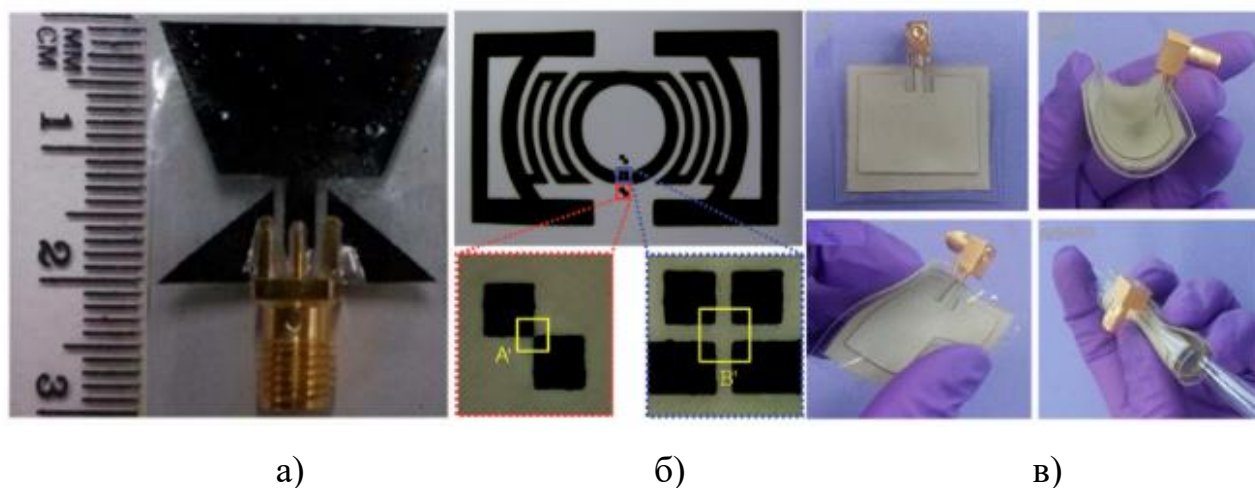


Рисунок 1.3 - Схема антен з різними матеріалами: (а) полімерна надширокопasmової антена з використанням полі (3,4-етилендіоксітіюфен) полістиролсульфонату (PEDOT: PSS) [52], (б) гібридна паста з вуглецевих наночастинок та поліаміліну з платиновим декором для гнучкої широкопasmової дипольної мітки антени [40], і (в) розтягується мікросмужкова патч-антена, що складається з нанодропу. (AgNW) / полидиметилсилоксан (PDMS) гнучкий провідник [47]

Таблиця 1.1 - Електропровідні матеріали та значення їх електропровідності

Типи матеріалів	Провідні матеріали	Провідність, σ (См/м)
Металеві наночастинки	Ag nanoparticle [53]	2.173×10^7
	Cu nanoparticle [54]	1×10^6
Провідні полімери	PEDOT:PSS [55]	100–1500
	Polyaniline (Pani) [55]	5
	Polypyrrole (PPy) [55]	40–200
Електропровідні полі- мери з добавками	C nanotube [56]	4000–7000
	PANI/CCo Composite [57]	7300
	AgNW/PDMS [33]	8130
	Ag flakes + Fluorine Rubber [34]	8.5×10^4
Graphene Based materials	Nanoflakes [58]	6×10^5
	Paper [41]	4.2×10^5
	Meshed Fabric [59]	2×10^5
Рідкий метал	Eutectic GaIn [50]	3.4×10^6

1.2.2 Субстрати

Матеріал підкладки, що використовується в гнучкій антені, повинен мати мінімальні діелектричні втрати, низькі відносні діелектрична проникність, низький коефіцієнт теплового розширення та висока теплопровідність [60]. Таке обмеження обумовлено необхідністю підвищення ефективності (у різних середовищах) за рахунок більшої антени за розміром. Винятком із вищезазначеного факту є необхідність великої діелектричної проникності для мініатюрних антен. При виготовленні гнучких антен часто використовуються три типи підкладок: тонке скло, металева фольга, пластмаси чи полімерні підкладки [61]. Хоча тонке скло можна гнути, внутрішня тендітна властивість обмежує його корисність. Металева фольга може витримувати високі температури та забезпечувати неор-

ганічні матеріали для нанесення на нього, але шорсткість поверхні та висока вартість матеріалів обмежують його програми [62]. Пластикові або полімерні матеріали – найкращі кандидати для застосування в гнучких антенах. які включають: (1) термопластичні напівкристалічні полімери: поліетилентерефталат (ПЕТ) та поліетиленнафталат (PEN), (2) термопластичні некристалічні полімери: полікарбонат (PC) і полієфірсульфид (PES), і (3) висока температура склування, матеріали Tg: поліімід (PI) [2,63].

В останні роки вони популярні та привабливі для гнучкої електроніки завдяки своїй надійності, гнучкості, змочуваністю та розтяжністю. Через високу Tg поліімід є одним з найбільш кращих матеріалів для гнучких антен, які використовували як підкладку в попередніх дослідженнях [64–72]. Sanusi та інші [55] повідомив про конструкцію та характеристики диполя зі штучним магнітним провідником (AMC) антена на каптон-поліімід для збору РЧ-енергії в контексті крові наступного покоління системи опромінення. ПЕТ і PEN є переважними у багатьох конструкціях гнучких антен із-за відмінного електричного, механічного та вологостійкі властивості [73]. Для виготовлення гнучких антен, ПЕТ широко використовується через його чудові конформні властивості і механічні характеристики стабільність [73-77]. У більш ранньому звіті [78] монопольна дискова антена з прорізами для струминного друку була розроблений, надрукований та проаналізований у промисловому, науковому та медичному (ISM) діапазоні 2,45 ГГц на ПЕТ для раннього виявлення мозкового інсульту. Потім була виготовлена нова повністю органічна гнучка патч-антена з PEDOT:PSS на вибраній тканинній підкладці з ПЕТ для антен наступного покоління, що носяться [79]. Копланарний квадратний монополь, що працює на частоті 60 ГГц із загальним ККД 68% та максимальним реалізованим посиленням 1,86 дБі була представлена в [80] на підкладці PEN. Підкладки з ПЕТ та PEN мають відмінну конформність, Проте низька температура склування обмежує їх застосування за умов високих температурних умов [2].

Гнучкі антени, призначені для цілей, що потребуються, в унікальних атрибутах, таких як обмежена видимість для користувача, надійна робота антен в

різних умовах, механічна стабільність та стійкість строгість, наприклад прання та прасування [81]. Різні типи підкладок, що використовуються в антенах, що носяться, мають повідомлялося у попередній статті [13]. Повсть, фліс, шовк та кардура, стандартні (електро) текстильні матеріали, і стандартний одяг - це кілька прикладів підкладок, які використовувалися для носіння / гнучких антен. Використання полімеру полідиметилсилоксану (ПДМС) як субстрату все більше і більше. через його низький модуль Юнга (<3 МПа), що передбачає високу гнучкість / конформність [82]. Тим не менш, розробка гнучкої антени на підкладці PDMS обмежена через слабку метал-полімерну адгезія. Тим не менш, деякі рішення цієї проблеми були знайдені в літературі, наприклад імплантація листи вуглецевих нанотрубок [83] або різні мікросфери, такі як скло, фенол або силікат [83], або нанодроту (AgNWs) [47,84], інжекція рідкого металу [85] та обробка кисневою плазмою на поверхні PDMS [2,86-88].

Паперова підкладка була кращою для гнучких антен через рентабельність і простота виготовлення. Гнучка СШП антена з копланарним хвилеводом (CPW), що працює від 3,2–30 ГГц (161% фракційної смуги пропускання (FBW)) для програм Інтернету речей на фотопапері в [89]. Ullah та ін. [90] продемонстрували конструкцію гнучкої антени на паперовій основі для системи внутрішньокорпоративної телемедицини у діапазонах промислового, наукового та медичного радіо (ISM) 2,4 ГГц. Рідкокристалічний полімер (ЖКП) являє собою гнучку друковану схему, подібну до тонкоплівкової підкладки, і вважається привабливим для високочастотних гнучких антен завдяки низьким діелектричним втратам, нижчому вологопоглинанню, стійкі до дії хімікатів і витримують температуру до 300 °C [91]. Гнучка міліметрова хвиля. Антенна решітка (міліметрового діапазону) на тонкій плівці із гнучкого рідкокристалічного полімеру для п'ятого покоління (5G) бездротові мережі, що працюють у Ka-діапазоні (26,5-40 ГГц), представлені в [92], а рідинна кристалічний метаматеріал на основі полімеру, навантажений гнучкою круговою поляризацією антени на підкладці LCP. запропоновано в [93], працюючи в Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) та бездротових діапазонів локальної мережі

(WLAN). У таблиці 2 показані часто використовувані підкладки для гнучкої антени виготовлення разом з їх діелектричною проникністю, діелектричними втратами та значеннями товщини. На рисунку 1.4 показано гнучкі прототипи антен на різних підкладках [2].

Без сумніву, можна дійти невтішного висновку, що вибір матеріалу підкладки має першорядне значення у реалізації гнучких антен. Завдяки своїй конформній поведінці та експлуатаційній придатності, гнучкі матеріали викликали величезний інтерес. Ці гнучкі матеріали необхідно ретельно вибирати, щоб витримувати умови фізичної деформації, такі як вигин, розтягування і навіть скручування при збереженні його функціональності. Гнучкі антени вимагають використання діелектричних матеріалів з низькими втратами як підкладки та матеріали з високою провідністю як провідники для ефективного прийому / передачі електромагнітного випромінювання. Гнучкі підкладки, що нещодавно з'явилися, для носимих / гнучких антен включають в себе: Каптон, ПЕТ, папір, рідкокристалічний полімер, різні тканини та папір через їх унікальні фізичні властивості, електричні та механічні властивості. виникає через його низького модуля Юнга (<3 МПа), що свідчить про високу гнучкість/конформність [82]. Однак розробка гнучкої антени на підкладці PDMS обмежена через слабку метал-полімерна адгезія. Проте, деякі рішення цього питання було знайдено у літературі такі як імплантація листів вуглецевих нанотрубок [83] або різних мікросфер, таких як скло, фенол або силікат [83] або нанодроту (AgNW) [47,84], інжекція рідкого металу [85] та обробка кисневою плазмою на поверхні ПДМЗ [86-88]. Паперова підкладка краща для гнучких антен через рентабельність і простоту виробництва. Гнучка СШП антена з копланарним хвилеводом (CPW), що працює в діапазоні 3,2-3 ГГц (161% фракційної смуги пропускання (FBW)) для додатків IoT на фотопапері був представлений у [89]. Ullah та ін. [90] продемонстрували конструкцію гнучкої антени на паперовій основі для внутрішньокорпоративного системи телемедицини в діапазонах промислового, наукового та медичного радіо (ISM) 2,4 ГГц. Рідина кристалічний полімер (LCP) являє собою гнучку друковану схему, подібну до тонкоплівкової підкладки, і

вважається привабливою. для високочастотних гнучких антен через низькі діелектричні втрати, менше вологопоглинання, стійкість до хімічних речовин і витримує температуру до 300°C [91]. Гнучка міліметрова хвиля, антенна решітка (міліметрового діапазону) на тонкій плівці з гнучкого рідкокристалічного полімеру для п'ятого покоління (5G) бездротові мережі, що працюють у К-діапазоні (26,5-40 ГГц), представлені в [92], а рідинна, кристалічний метаматеріал на основі полімеру, навантажений гнучкою поляризацією кругової антени на підкладці LCP. Запропоновано в [93], працюючи в Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) та бездротових діапазонів локальної мережі (WLAN). У таблиці 1.2 показані часто використовувані підкладки для гнучкої антени. виготовлення разом з їх діелектричною проникністю, діелектричними втратами та значеннями товщини. На рисунку 1.4 показано гнучкі прототипи антен на різних підкладках [2].

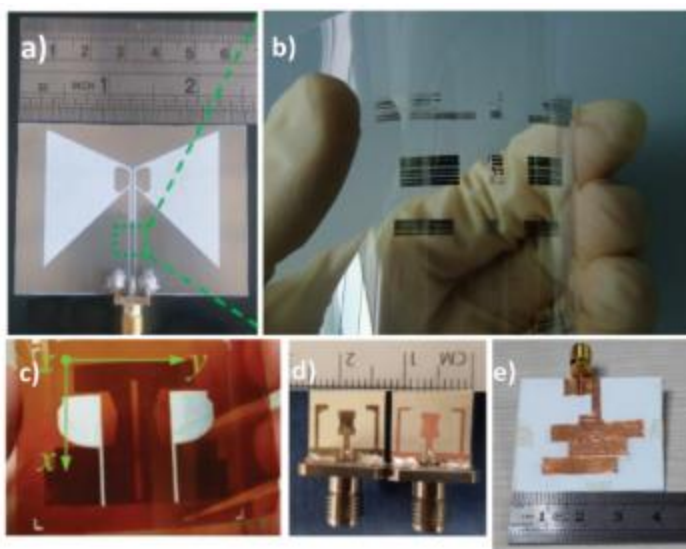


Рисунок 1.4 – Виготовлені прототипи антен на: (а) поліетилентерефталаті (ПЕТ) [77], (б) поліетиленнафталат (PEN) [70]; (в) Поліімід [69]; (г) рідкокристалічний полімер (LCP) [92], та (д) паперові підкладки [90]

Без сумніву, можна дійти невтїшного висновку, що вибір матеріалу підкладки має першорядне значення у реалізації гнучких антен. Завдяки своїй конформній поведінці та експлуатаційній придатності, гнучкі матеріали викликали величезний інтерес. Ці гнучкі матеріали необхідно ретельно вибирати, щоб ви-

тримувати умови фізичної деформації, такі як вигин, розтягування і навіть скручування при підтримка його функціональності. Гнучкі антени вимагають використання діелектричних матеріалів з низькими втратами як підкладки. та матеріали з високою провідністю як провідники для ефективного прийому / передачі електромагнітного випромінювання. Гнучкі підкладки, що недавно з'явилися, для носимих / гнучких антен включають в себе: Каптон, ПЕТ, папір, рідкокристалічний полімер, різні тканини та папір через їх унікальні фізичні властивості, електричні та механічні властивості [2].

Таблиця 1.2 - Зазвичай використовувані гнучкі підкладки із зазначенням їхньої діелектричної проникності, тангенса кута втрат і товщини [2]

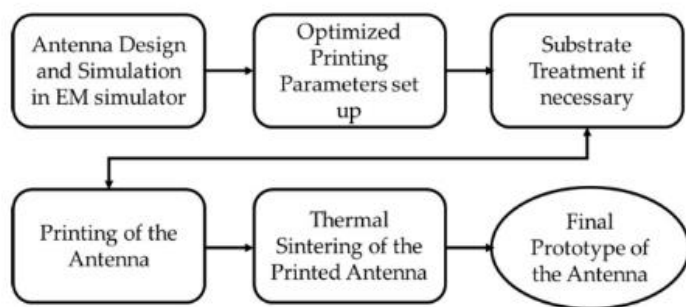
Субстрати		Відносна діелектрична проникність	Тангенс кута діелектричних втрат	Товщина, мм
PET [73]		3	0.08	0.14
PEN [80]		2.9	0.025	0.125
Polimide [71]		2.91	0.05	0.2
PDMS-MST [94]		3.8	0.015	-
PDMS [83]		2.65	0.02	-
PDMS зі скляною мікросферою [83]		1.85	0.014	-
PDMS з фенольною мікросферою [83]		2.24	0.022	-
PDMS з силікатною мікросферою [83]		2.45	0.02	-
Папір (фотопапір Kodak) [89]		2.85	0.05	0.254
Рідкокристалічний полімер (ULTRALIM 3850) [72]		2.9	0.0025	0.1
Підкладки для антен, які можна носити	Флісова тканина [95]	1.25	-	2.56
	Кордура [96]	1.1-1.7	0.0098	0.5
	Вовняна фетр [97]	1.16	0.02	3.5
	Фетр [98]	1.3	0.02	1.1
	Бавовна/поліестер [99]	1.6	0.02	2.808

1.3 Методи виготовлення гнучких друкованих антен

Характеристики гнучкої антени визначаються методом виготовлення (який відрізняється для різних підкладок). Загальні методи виготовлення включають вологе травлення, струменевий друк, трафаретний друк та інші спеціальні методи виготовлення гнучких антен, що носяться. Детальний огляд різних технологій виготовлення гнучких антен можна знайти у ранніх звітах [2,25,26].

1.3.1 Струменевий друк

Технологія струменевого друку постала як альтернатива традиційним технологіям виготовлення, такі як травлення та фрезерування. Це адитивний процес, тому дизайн передається безпосередньо наноситься на підкладку без масок і забезпечує меншу витрату матеріалу [10]. Це кращий технологія виготовлення полімерних підкладок, таких як поліімід, ПЕТ, папір, завдяки її точності та метод виготовлення швидкого прототипу [10]. На рисунку 1.5 показано огляд процесу друку та вузол принтера [2].



(a)



(b)

Рисунок 1.5 – Огляд процесу струминного друку для виготовлення антени. (a)

Блок-схема струминного друку, процес друку [11] та (b) Dimatix Materials Printer, DMP-2800 (FUJIFILM Dimatix Inc., Санта-Клара, Каліфорнія, США) та ПК, який використовується для керування принтером [2]

Для друкованих цілей використовуються металеві чорнила з наночастинками, чорнило з графеновими наночастинками, металоорганічні чорнила. вико-

ристовуються. Техніку друку можна розділити на два типи: drop-on-demand (DoD) та безперервний струменевий друк. Друкуючі головки типу Drop on Demand подають на чорнило імпульси тиску за допомогою п'єзоелектричного або термоелемент, у якому крапля при необхідності викидається із сопла [25]. Принтери нового покоління пропонують точну друк з використанням картриджів з піколітровим об'ємом. Якість друку контролюється струменевим друком. форма хвилі, напруга упорскування форсунок, частота упорскування, температура картриджа, валикова температура (де розміщена підкладка) та роздільна здатність малюнка [11, 12]. Після друку конструкції антени необхідно спікання для видалення розчинника та закупорювального засобу та досягнення електропровідність [2, 13].

Прикладом струминного друку є використання чорнила з наночастинками срібла для виготовлення широкосмугового друку. Правостороння кругова поляризована мікросмужкова матрична антена 4×4 з високим коефіцієнтом посилення на підкладці з ПЕТ за допомогою принтера Epson stylus c88 series [75]. Інший приклад антени, надрукованої на струменевому друку, - епідермальна антена. антени, що підходять для радіочастотної ідентифікації (RFID), та зондування на прозорій плівці з ПЕТ був представлений у ранній роботі [76]. Унікальною особливістю цього методу виготовлення антен є те, що немає потрібне термічне спікання (модель принтера – Brother MFC-J5910DW). Мініатюрний, повністю надрукований струменевим друком гнучка антена з кількома входами та виходами (MIMO) для надширокосмугового (UWB) програми була запропонована на поліімідній підкладці з каптону із використанням принтера Dimatix DMP 2800 [69]. Використання Dimatix DMP 2831, гнучка, що носить і оборотно деформована антена з живленням від CPW була розроблена на основі ПЕТ підкладка з використанням наночастинок срібла [14]. Багатоспрямована антена Яги-Уда з високим коефіцієнтом посилення для використання в діапазоні ISM 2,45 ГГц був реалізований з використанням срібла та діелектричних чорнил на підкладці LCP з використанням того ж принтер [2, 105].

Ще одна робота з використанням фотопаперу для виготовлення багатосмугової антени, що реконфігурується, через два p-i-n про діоди повідомлялося [6]. Нове струмопровідне чорнило на основі наночастинок срібла з вбудованою функцією спікання. механізм, який спрацьовує під час висихання надрукованого малюнка, був використаний для зменшення вартість обладнання та виключити трудомісткість подальшої обробки друкарського шару [7]. Тим часом, хімічно затверділі провідні чорнила (наночастинки Ag) були використані для виготовлення Z-подібної антени для роботи в діапазоні ISM (2,45 ГГц) на недорогій попередньо обробленій підкладці з ПЕТ [8]. Дозвіл друку для струминного друку гнучка антена залежить від шорсткості поверхні підкладки. Для гладкості на таких підкладках, як поліімід, ПЕТ, PEN, LCP, фотопапір і т. д. досягається відмінна роздільна здатність малюнка. для гнучких матеріалів, таких як електронний текстиль, зазвичай з плетінням з ниток основи і качка. мати нерівну поверхню. Адекватне вирішення залишається проблемою [9]. Для виготовлення переносної/гнучкої антени, зшивання, вишивка та підкладка, інтегрована основа хвилеводу (SIW) методи переважно дотримуються [2].

1.3.2 Знімок екрану

Трафаретний друк - це просте, швидке, економічне та життєздатне рішення для виготовлення гнучкої електроніки, який набув широкого поширення для реалізації антен RFID шляхом друку провідних фарб або паст на недорогі гнучкі підкладки, такі як ПЕТ, папір та текстильні підкладки [10]. Це тканий екран на основі техніка, що має різну товщину та щільність нитки. Лезо швабри опускається, змушуючи екран торкається підкладки для отримання друкованого малюнка. Таким чином, бажаний візерунок утворені чорнилом, що виходить через відкриті ділянки екрана на прикріпленій підкладці [11]. Це також адитивний процес, такий як струминний друк, на відміну від субтрактивного процесу хімічного травлення, що робить його більш економічним та екологічно чистим. Трафаретний друк із подвійною поляризацією Були продемонстровані антена 2,45 ГГц та ректену на полікоттоні для передачі та збору ВЧ-потужності. у по-

передній статті [12]. Ректена була протестована і порівняна з аналогічною ректенною FR4, та продуктивність виявлено на третину від стандарту FR4 [2].

Антенна система високочастотного RFID-зчитувача виготовлена методом трафаретного друку сріблом (Ag). чорнило у вигляді частинок на гнучку паперову основу, що працює на частоті 13,56 МГц [13]. Ця антена з трафаретним друком продуктивність (коефіцієнт добротності) була значно нижчою порівняно з рамковим антенним елементом з міді та сама геометрія. Щоб покращити це, необхідно зменшити опір антени постійному струму, додавши більше срібла. Друковані шари, що зрештою збільшує вартість виробництва. Оскільки трафаретний друк рентабельний, частково відбиває поверхню з паразитним масивом патчів для створення простого перемикач променя, низькопрофільного, а гнучка система виявлення була розроблена на гнучкій підкладці від PremixGroup [14]. Антенна решітка була надрукована на трафаретному принтері Aurel Automation 900, а антена була оптимізовано для діапазону 77 ГГц і має високе посилення 11,2 дБ, що дозволяє виявляти об'єкти в межах діапазону 10 м. Процес виготовлення показаний на рисунку 1.6 [2].

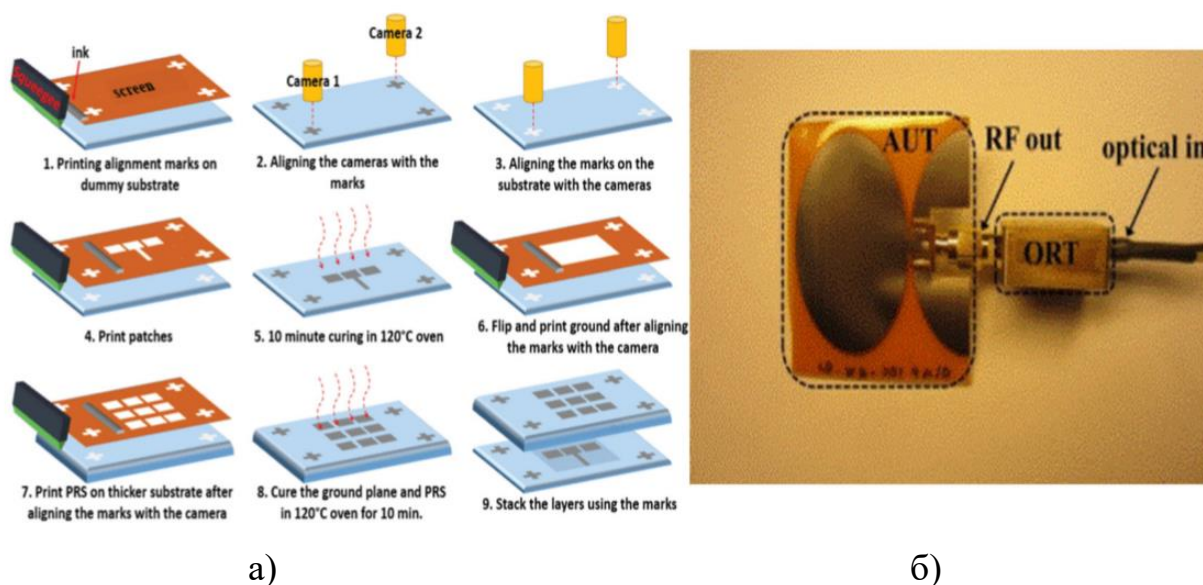


Рисунок 1.6 – Схема процесу виготовлення антени трафаретним друком: (а) процес виготовлення паразитного пучка-перемикач антенної решітки міліметрового діапазону [14] та (б) трафаретний друк графенових пластівців на основі широкопasmової еліптичної дипольної антени [15]

A DEK Horizon 03i (складання ASM Systems Weymouth Limited, Уеймут, Великобританія) напівавтоматичний трафаретний принтер був використаний для виготовлення широкосмугова еліптична дипольна антена на основі лусочок графена на поліімідній підкладці, що працює від 2–5 ГГц для недорогих програм бездротового зв'язку [115]. Трафаретний друк рентабельний в порівнянні з іншими технологіями виготовлення гнучких антен. Однак він має деякі обмеження, наприклад залежність дозволу від якості поверхні підкладок, обмеженого контролю шару та відсутності контроль товщини провідного шару. На рисунку 6 показано виготовлення гнучкої антени з використанням процес трафаретного друку та зразок прототипу [2].

1.3.3 3-D друк

Останнім часом все більшої популярності набирають адитивні методи тривимірного друку гнучких антен безліч комерційно доступних друкованих матеріалів і процесів. Він має ряд переваг, таких як власне швидке виготовлення складних тривимірних конструкцій з різних матеріалів, а також можливість змінювати щільність об'єкта, що друкується [16–18]. Гнучкість у реалізації складних тривимірних форм об'ємні матеріали та тривимірний друк гнучких матеріалів, таких як полімери, метали, кераміка і навіть біологічні тканини роблять його привабливим для конструкції антен [19]. Полімери, такі як терморезистивні та термопласти, використовуються як матеріали для тривимірного друку для гнучких антен. Загальні методи друку полімери: моделювання наплавленого осадження (FDM), стереолітографія (SLA), обробка прямим світлом. (DLP) та струминна обробка матеріалів (MJ) [20]. Найпоширеніша технологія тривимірного друку – це FDM. У FDM нитка подається на екструзійну головку принтера, а двигун нагрітого сопла змушує нитку плавити її. Потім принтер поміщає розплавлений матеріал у точне місце, де остигає і твердне. Процес повторюється, складаючи деталі шар за шаром [2, 20].

Один з перших прикладів використання тривимірного друку в компонентах НВЧ та антенна фабрикація була представлена у більш ранній статті [17].

NinjaFlex, нова гнучка нитка з можливістю тривимірного друку, був прийнятий для виготовлення патч-антени з тривимірною печаткою. Техніка FDM використовувалася для реалізувати 3-D друковану підкладку. Патч-антена з лінійною поляризацією була розроблена та реалізована на 100% заповнення підкладки NinjaFlex за робочої частоти 2,4 ГГц (рис. 1.7,а). Експериментальна перевірка у номінальних умовах та умовах вигину показав гарну згоду з моделюванням. "Гудзик" компактна RFID-мітка, виготовлена шляхом поєднання технологій тривимірного друку та струминного друку, повідомляється в [21] для додатків, що носяться (рис. 1.7,в). Антена показала хороші характеристики з максимальним вимірним діапазоном зчитування 2,1 м у Федеральній комісії зв'язку RFID діапазон (902-928 МГц). Доказ концепції виготовлення та аналізу продуктивності гнучких та антена, що носяться, на тривимірній друкованій підкладці NinjaFlex представлена в [2, 22].

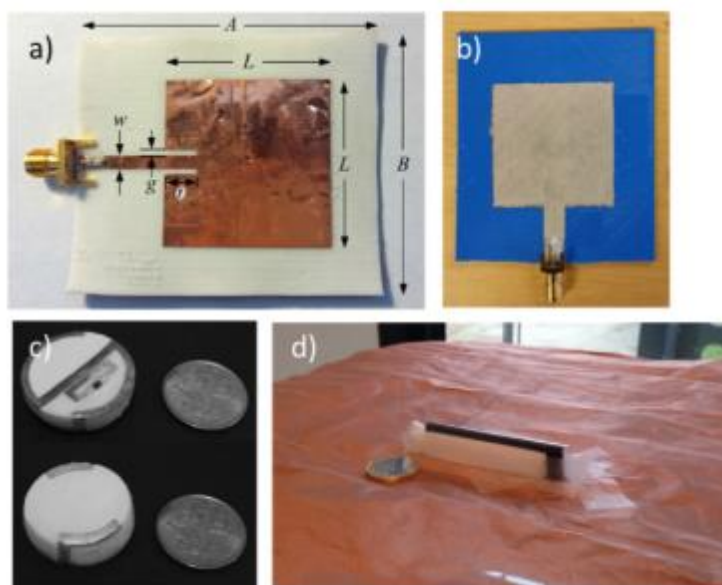


Рисунок 1.7 – Приклади типових гнучких друкованих антен: (а) квадратна патч-антена на підкладці NinjaFlex (розміри в мм $A = 65$, $B = 55$, $L = 35,8$, $w = 3$, $g = 1$, $t = 7$), (б) пофарбована антенною пензлем на тривимірному зображенні друкована підкладка, (с) антена для мітки 3-D радіочастотної ідентифікації (RFID) у формі кнопки, та (д) гнучка перевернута F-антена з тривимірним друком (IFA)

Випромінювач антени був пофарбований пензлем з срібної провідної пастки, що розтягується. (Рисунок 1.7,б). Бездротові характеристики антени в плоских умовах та в умовах вигину були задовільними. Моделювання питомого коефіцієнта поглинання (SAR) підтверджує його використання для пристроїв, що носяться. Антена продемонструвала смугу імпедансу 990 МГц (1,94–2,93 ГГц) із піковим посиленням $-7,2$ дБ на частоті 2,45 ГГц. Антена-метелик з живильною структурою CPW була виготовлена на настільному тривимірному принтері [23]. Як діелектрик використовувалися нитки з полімолочної кислоти (PLA) і акрилонітрилбутадієнстиролу (ABS). та провідні частини антени, відповідно, які показали широку смугу пропускання, гнучку структуру, легкий та невеликий розмір. Нещодавно з'явилася тривимірна гнучка мініатюрна перевернута F-антена для пристроїв, що носяться. програми були розроблені, виготовлені з використанням рідкого металу Галінстан для реалізації випромінюючих елемент, гнучкий пластик NinjaFlex для реалізації діелектричної підкладки за допомогою тривимірного друку FDM процес (рис. 1.7,д) та електротекстильна мідь, що становить заземлюючу поверхню антени [24]. Працездатність антени у кількох вигнутих конфігураціях та за наявності тіла людини визнаний задовільним [2].

1.3.4 Хімічне травлення

Хімічне травлення, що часто супроводжується фотолітографією, виникло у 1960-х роках як відгалуження виробництва друкованих плат (PCB) – це процес виготовлення металевих малюнків із використанням фоторезиста. Та травники для корозійного фрезерування обраної області. Для виготовлення складних конструкцій з високою роздільною здатністю точно, це найкращий вибір серед інших методів виготовлення [25]. Органічні полімери підходить для фоторезистів, тому що їх хімічні характеристики змінюються під впливом ультрафіолету світло. Поточна практика в галузі виробництва антен та радіочастотних схем на основі фотолітографії в основному заснована на позитивні резисти, оскільки вони мають більшу роздільну здатність, ніж негативні резисти. Багатошаровий

тип гнучкої монопольна антена була спроектована і виготовлена на прозорій поліімідній підкладці для застосування. В окулярах, що носяться, в більш ранній статті [126]. Оксид індія – цинку – олова (IZTO) / Ag / IZTO товщиною 100 нм. (IAI) - прозорий (81,1%) провідний оксидний електрод, який використовувався як провідники антен. і площині землі окулярів. Процес фізичного осадження з парової фази (PVD) використовується для виготовити багат шарові гнучкі антени. Процеси виготовлення показані рисунку 1.8 [2].

Процес осадження з парової фази (PVD) використовується виготовлення гнучких антен цього багат шарового типу. Процеси виготовлення показані рисунку 1.8. Ця робота показує можливість використання гнучких антен, що носяться, для оптичних та електричних. програми, що використовують процес фотолітографії. Практична антена 5,8 ГГц для бездротового зв'язку операція проводилася на гнучкому склі методом фотолітографії з використанням фоторезиста Shipley S1813 та генератор патернів μ PG 101 від Heidelberg Instruments. [27]. Легований алюмінієм товщиною 100 нм. перед нанесенням розпорошенням індія-олова завтовшки 650 нм служив буферним шаром на склі. оксидний (ITO) шар. Після літографії ITO труїли травленням щавлевою кислотою, відпалювали в система швидкого термічного відпалу в азоті при 500°C протягом 5 хв зі швидкістю наростання 5°C/с. Петлі та Зміни сітки можливі з використанням цієї методології. Невеликий розмір (2,5 см \times 5 см) епідермальний Антена RFID була виготовлена з використанням чотирьох різних виробничих систем, включаючи фотолітографію [28]. Процес показаний на рисунку 1.8. Тут Au використовується як провідник антени з Ti/W, адгезійний шар на поліімідній основі. Хоча пропускна здатність з високою роздільною здатністю була можлива використання мікротехнологій, високі витрати, пов'язані з чистими приміщеннями, фотошаблонами, хімічні речовини для фотолітографії та людські ресурси запобігають пошкодженню епідермальної антени, недорого та одноразово. Технологічний процес з використанням фотолітографії та розпилення був досліджений для виготовлення високоякісної Cu антени на підкладці з ПЕТ без пошкодження шару, що несе [29]. На закінчення, складні та деталізовані антени можуть

бути виготовлені за допомогою фотолітографії. Однак тривалий процес, поряд із використанням небезпечних хімікатів, високотехнологічних дороге обладнання для чистих приміщень, фотошаблони та хімікати з людськими ресурсами обмежують їхнє застосування при виготовленні гнучких антен [2].

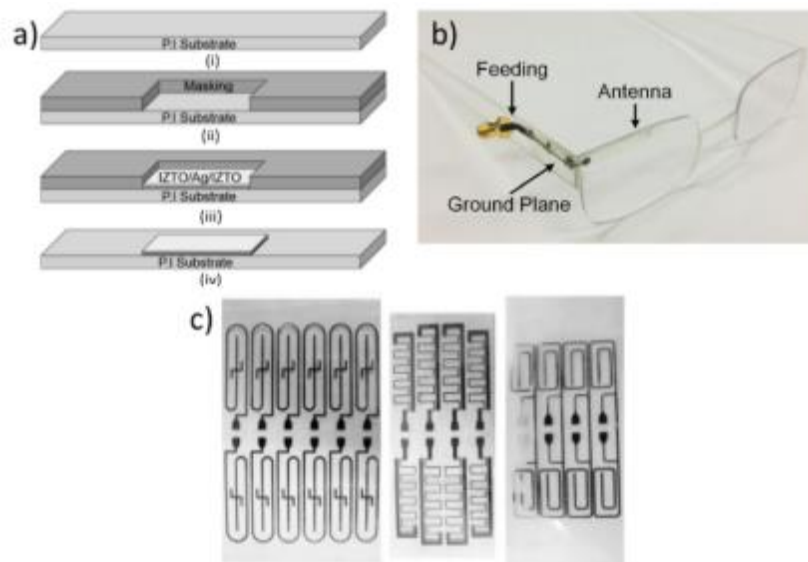


Рисунок 1.8 – Приклад антени на основі вологого травлення: (а) прозора та гнучка антена. Процес виготовлення: (і) очищення поліімідної (PI) підкладки; (ii) маскування. (iii) осадження; та (iv) маскавидалення [136] та (б) виготовлена антена з оксиду індія-цинку-олова (IZTO) / Ag / IZTO (IAI) [126] та (б) Ситтонкоплівкова RFID-антена надвисокої частоти (UHF) на ПЕТ з використанням фотолітографії та напилення [28]

1.3.5 Спеціальні методи виготовлення гнучких антен, що носяться

Спеціальні технології виготовлення гнучкої антени можна розділити на: категорії: (1) технологія на основі SIW; (2) шиття та вишивка; (3) використання провідного текстилю пряжа для вишивання провідних малюнків антени на непровідній текстильній підкладці; та (4) струменевий та трафаретний друк на непровідних текстильних матеріалах. У цій статті основна увага приділяється перші дві техніки [2].

1.3.5.1. Технологія на основі інтегрованого хвилеводу (SIW) підкладки. Відносно новий метод, який називається інтегрованим хвилеводом з підкладкою (SIW), дуже бажаний. реалізувати майбутню систему на платформах підк-

ладки (SoS) для розробки високопродуктивних міліметрових хвиль системи [129]. Ця структура забезпечує утримання електричних полів усередині порожнини за рахунок використання закорочують перехідних отворів на його бічних стінках, що підтримуються повною заземлюючою пластиною. Основні переваги SIW Засновані на технологіях - це покращення добротності антени та покращення розв'язки між антена та тіло користувача. Компактний інтегрований хвилевід, що носить (SIW) тридіапазонна (ISM, WiMAX та військово застосування) шкіряна антена, призначена для оптимального використання на тілі продуктивність запропонована в [130]. Використовуючи латунні люверси та комбінацію провідних та непровідні шкіряні матеріали, інтегрована порожнина хвилеводу підкладки із заземлюючим шаром була реалізована, а мініатюризація досягається за рахунок введення щілин. В іншому дослідженні [21] недорогий SIW антена з чистої мідної тафти, витрачена на вовняній повстяній підкладці, що працює від запропонованої частоти від 2,27 до 3,61 ГГц (рисунок 1.9,б) [2].

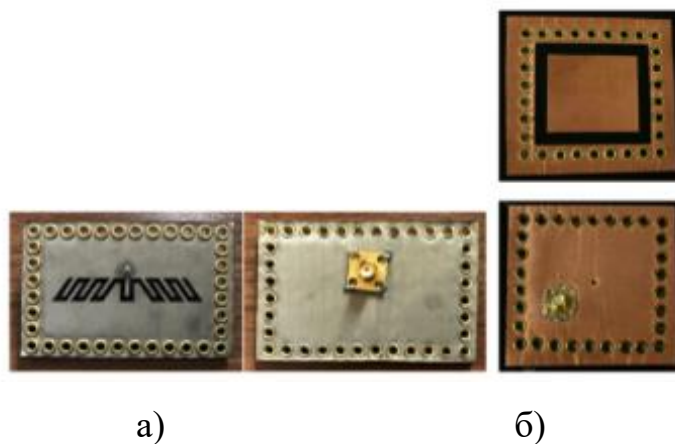


Рисунок 1.9 – Антени, виготовлені методом інтегрованого хвилеводу (SIW): а) прототип антени SIW з використанням провідних тканин [32] та (б) прототип кругової поляризованої антени SIW [31]

Топологія антени заснована на складчастому резонаторі з кільцевим кільцем як випромінюючий елемент з ефективністю випромінювання 73%. Потім була виготовлена антена на основі СІВ на основі провідної тканини, вовняна підкладка для аплікацій поза тілом у більш ранньому звіті [32] (рис. 1.9,а). Ан-

тени виготовлені для використання методом SIW показано на рис. 1.9. Антена WLAN з нової флісової тканини для пристроїв, що носяться про такі додатки як спортивний одяг та одяг для аварійних працівників, повідомлялося раніше [2, 33].

1.3.5.2 Шиття та плетіння

Плетіння або в'язання провідного текстилю на основі - ще один метод виготовлення гнучкі антени, що носяться. В'яжемо мідь на флісовій основі, перша компактна тканинна антена. Дизайн комерційного смарт-одягу був представлений у більш ранній статті [34]. Вишивка з струмопровідна пряжа - це простий метод виготовлення з великим потенціалом гнучкої антени. виготовлення через його сумісність із можливостями неелектронної обробки текстилю. Вишитий антенні IC входи в пасивні електротекстильні мітки UHF RFID та можливість створення планарний дипольний тег тільки з вишивкою меж повної форми антени був вивчений раніше [35]. Спіральна архімедова антена діаметром 160 мм була сплетена із семи ниток розжарення. посріблені мідні E-нитки Elektrisola на підкладці з кевларової тканини [36]. Галузь застосування ця антена покривала кілька широкосмугових, конформних та несучих додатків, таких як бортові і пристрої, що носяться. Нещодавно було представлено поєднання цих двох методів (шиття та вишивки) у дослідженні [37] (рисунок 1.10,в) [2].

Ця робота продемонструвала можливість реалізації цільнотекстильної антени, що зменшує зворотне випромінювання з допомогою використання топології SIW. Нова вишита антена з метаматеріалу на основі як екрануюча структура електромагнітної забороненої зони (EBG) роз'ємного кільцевого резонатора (SRR) була представлена в [38] (Рисунок 10а). Рознімний кільцевий резонатор (SRR) був введений в антену для зменшення значення SAR, що покращило б роботу антени. Для ефективною конструкції антени якість, міцність, і гнучкість струмопровідної пряжі, точність вишивальної машини, щільність рядки, та напрямок на тканини є основними факторами, які слід враховувати [39]. Рисунок 1.10,б показує вишивку процес виготовлення метаматеріалів [2].

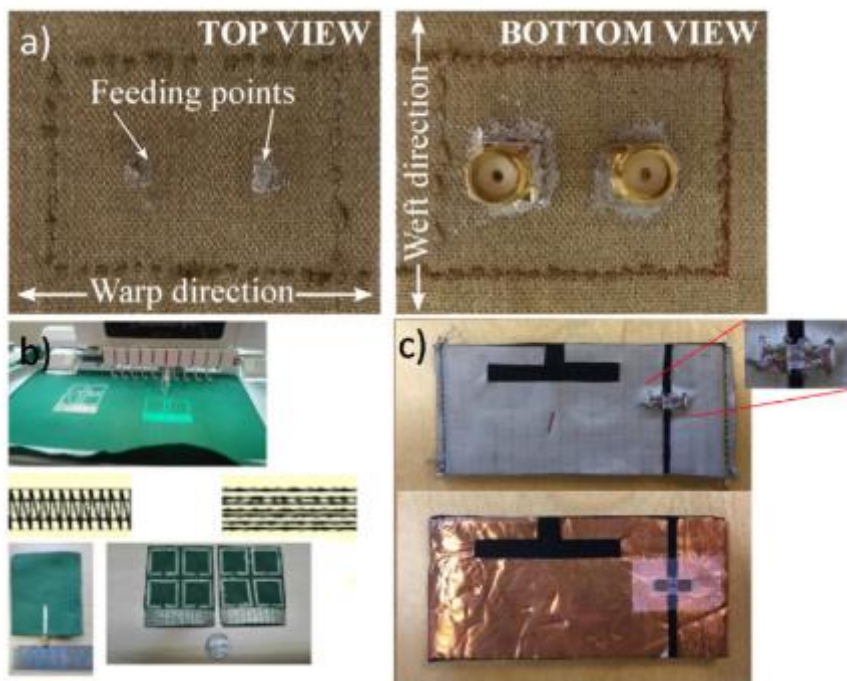


Рисунок 1.10 – Гнучкі антени на основі вишивки та вишивання: (а) змішана вишита-тканяна текстильна інтегрована хвилеводна (TIW) антена: види зверху та знизу [38]; (б) вишивка з метаматеріалу процес виготовлення антени з вишивкою малюнка стібком та вишитими антенами [39], та (в) виготовлений електронний текстиль на основі щілинної патч-антени, створений за допомогою швейної машини та мідної стрічки [37]

1.4 Застосування гнучких друкованих антен у різних діапазонах частот

Навіть найконсервативніший прогноз зростання Інтернету речей (IoT) показує, що до 2025 обсяг світової індустрії Інтернету речей досягне 363,3 мільярда доларів США [40]. Значна частина цей ринок включає прилади для моніторингу здоров'я та клінічні терапевтичні прилади, медичну мікрохвильову радіометрію, пристрої, автомобільні навігаційні системи і т. д. Через характер цих додатків антени використовуватися повинні бути гнучкими, конформними і розтягуються, щоб відповідати криволінійним поверхням та динамічним руху. Окрім цивільного застосування, він також відіграє життєво важливу роль у військовій сфері. Більшість із військових пристроїв підключені до великої однорангової ме-

режі. Військовослужбовці повинні нести велика кількість обладнання з різними датчиками та приладами для контролю здоров'я. Отже, гнучкий, а легкі антени бажані у військовому секторі, щоб зменшити навантаження на солдата. У статті гнучкі антени поділяються на дві категорії: нижче за 12 ГГц і вище 12 ГГц [2].

1.4.1 Нижче 12 ГГц

Розробка гнучких матеріалів відкрила шлях для інновацій у конструкції антен та нові програми, які були неможливі з твердими підкладками. Для гнучких антен нижче системи RFID-міток або смарт-карт із частотою 12 ГГц зазвичай проектуються з використанням гнучких антен на надвисоких частотах. Частотний (UHF) діапазон. Надширококутні застосування гнучкої антеної кришки WiMAX, WiFi, нижній діапазон 5G [41] і один із радіодіапазонів ISM. Для гнучких пристроїв відображення, що працюють у діапазоні УВЧ повідомлялося про дипольну антену на поліімідній підкладці з каптону [42]. Каптонний субстрат забезпечує механічну міцність та низькі діелектричні втрати для цієї антени. У діапазоні УВЧ антен для смарт-карт та RFID-міток домінують. Гнучкі RFID-мітки для неінвазивних датчиків, наприклад відстеження пацієнтів у медичній системі, пристроях Інтернету речей (IoT), дитячих закладах, вологості, повідомлялося про температурне зондування [43-46]. У більш ранній статті [47] гнучка антена RFID-мітки на основі фотопаперу, надрукована на струменевому друку, була повідомляється додатків УВЧ. Антена мала всепрямовану діаграму спрямованості 4,57 м-коду покриття з універсальним діапазоном УВЧ, 865-960 МГц. Гнучка антена RFID-мітки тимчасового тканинного типу був запропонований у попередньому дослідженні [43], максимальна дальність якого становила 1,2 м в іншому дослідженні [42] повідомлялося, що гнучка антена, надрукована на графенових наночастинках, переважно є меандрований лінійний диполь антени. Він охоплював частоту від 984 до 1052 МГц з ефективністю випромінювання 32% та коефіцієнтом посилення 4 дБі. Нова технологія тривимірного друку була використана для розробки антени RFID-мітки в [48]. А в [21],

була запропонована антена RFID-мітки у формі кнопки, що поєднує в собі технологію тривимірного та струминного друку. Ця антена показувала максимальну дальність зчитування 2,1 м. Гнучка тривимірна друкована антена для RFID-міток [149]. Було показано, що досягається максимальна дальність зчитування 10,6 м, і навіть за умов розтягування, він покриває понад 7,4 м-коду. Гнучкі антени пропонують багатообіцяюче рішення для тілесно-орієнтованої медицини, побутової електроніки, та військового застосування. Для додатків, що носяться, крім діапазонів УВЧ, частота 2,45 ГГц є широко використовуваним для програм ISM. Низькопрофільна, легка та міцна антена краща для цей тип програми. Для внутрішньокорпоративних телемедичних систем використовувалася гнучка антена на основі фотопаперу. припустив, що працює на частотах 2,33-2,53 ГГц [90]. В іншому дослідженні [50] текстильна антена, що носить з логотипом був запропонований, який був розроблений для військових програм, що працюють в діапазоні ISM. У літературі, повідомлялося про багато інших гнучких антен для застосування на тілі, які потрапляють у частоту ISM група [2, 51-55].

Інший тип антени, що часто використовується - це надширокосмугова (СШП) антена. У 2002 році федеральна комісія зв'язку (FCC) визначила діапазон СШП в діапазоні від 3,1 до 10,6 ГГц щоб задовольнити потребу у вищій швидкості передачі даних. Поширення тілесно-орієнтованих комунікацій, підкатегорія бездротових мереж тіла (WBAN), спонукала дослідників зосередитися на гнучкі ширококутові та надширококутові антени. Антени СШП мають такі важливі особливості, як невеликий електричний розмір, низька вартість, низька спектральна щільність потужності та висока швидкість передачі даних [56], і виявили широке використання. Через нижчу спектральну щільність антена менш схильна до перешкод. інші сигнали [57]. Антена СШП на текстильній підкладці може використовуватись на тілі застосування, оскільки він має мінімальний вплив на організм людини [58-62]. Струменевий друк на паперовій основі СШП антена була вперше представлена в більш ранніх дослідженнях [63, 64]. Пізніше різні форми проводки, патчі були розроблені для підвищення ефективності антени [63-66]. Компактна високоефективна гнучка антена на полі-

мерній основі запропонована [67]. У цьому дослідженні автори використали липку стрічку. і PEDOT як підкладка і провідний матеріал відповідно. Багато інших полімерів на основі про гнучкі СШП антени повідомлялося в літературі. До них відносяться рідкокристалічний полімер [68-71], полідиметилсилоксан (ПДМС) [172-174], плівка, зібрана з графену [75], штучний магнітопровід (АМС) [76-80], ПЕТ [81-83], папір [184] та поліамід [2, 85-87].

1.4.2 Вище 12 ГГц

За даними Radio Society of Great Britain (RSGB), вище 12 ГГц починається Ku-діапазон, і ці високочастотні діапазони в основному використовуються для радарів, супутникового зв'язку, астрономічних спостережень, радіоастрономія та мікрохвильове дистанційне зондування. Для дистанційного зондування, радара та зв'язку в майбутньому систем, мікросмужкові антенні решітки з подвійною поляризацією були зареєстровані на підкладці LCP, що працює на 14 та 35 ГГц. Подвійна поляризація та подвійна частота забезпечують більш високу пропускну здатність передачі даних [91]. Була розроблена гнучка, що міється і багаторазова антена СШП, що носить на повністю текстильній основі. аналізувався у ранніх звітах [88]. Він підтримує відмінний ККД від 3 до 20 ГГц, що проводить для додатків медичного моніторингу та розумного одягу. Наприклад, гнучкі графенові антени одиночний та масивний на поліімідній підкладці (рисунк 1.11,а), що працює на частоті 15 ГГц, забезпечує велику смугу пропускання для підтримки більш високих швидкостей додатків 5G [89]. У попередньому дослідженні [90] гнучка, прозора та ширококутова щілинна монопольна антена міліметрового діапазону був розроблений, виготовлений та випробуваний методом струминного друку чорнилом зі срібного нанодроту (Ag NW). Антена показала надшироку смугу пропускання до 26 ГГц (від 18 до 44 ГГц) високе випромінювання. ККД 55% та максимальне посилення 1,45 дБі. Порівняння монополя з живленням від CPW раніше повідомлялося про антени, надруковані на папері з ПЕТ та Erson, що працюють на частоті 20 ГГц [91]. Антени були надруковані з використанням чорнила на основі CuO на струменевому прин-

тері. Y-подібний прозорий та гнучкий копланарний антени з хвилеводним живленням (CPW), що працюють від 23 до 29,5 ГГц, що покривають необхідні смуги частот для бездротового зв'язку 5G був змодельований з використанням прозорої полієфірної плівки зі срібним покриттям (AgNT). провідний матеріал поверх підкладки з ПЕТ [92]. Ще одна робота високочастотної програми з використанням технологія струминного друку - це патч-антена з безконтактним живленням, розроблена для діапазону ISM 24 ГГц, що було продемонстровано у [93]. Ця антена була надрукована з використанням технології багат шарового друку підкладка LCP. Антени з частотою, що перебудовується, можуть працювати в різних діапазонах частот. В іншому дослідженні [94] була представлена реконфігурована антена міліметрового діапазону, що носить (MMW), що охоплює діапазон 20,7-36 ГГц у різних конфігураціях комутатора. Антена було надруковано на підкладці LCP. За технологією струминного друку. Діелектричні характеристики PDMS були у V- та W-діапазонах були перевірені та випробувані в [95]. У попередньому дослідженні [90] гнучка, прозора та широкопasmово щілинна монополярна антена міліметрового діапазону був розроблений, виготовлений та випробуваний методом струминного друку чорнилом зі срібного нанодроту (Ag NW). Антена показала надшироку смугу пропускання до 26 ГГц (від 18 до 44 ГГц) високе випромінювання. ККД 55% та максимальне посилення 1,45 дБі. Порівняння монополя з живленням від CPW Раніше повідомлялося про антени, надруковані на папері з ПЕТ та Epson, що працюють на частоті 20 ГГц [81]. У антени були надруковані чорнилом на основі CuO на струменевому принтері. Y-подібний прозорий та антени з гнучким копланарним хвилеводним живленням (CPW), що працюють від 23 до 29,5 ГГц, покриваючи необхідні смуги частот для бездротового зв'язку 5G, моделювалися з використанням срібного покриття, полієфірна плівка (AgNT), прозорий провідний матеріал на підкладці з ПЕТ [92]. Ще одна робота високочастотний додаток, що використовує технологію струминного друку, є патч-антенною з безконтактним живленням, розроблений для діапазону ISM 24 ГГц, що було продемонстровано [93]. Ця антена була надрукована з використанням технологія багат шарового друку на

підкладці LCP. Антени з частотою, що перебудовується, можуть працювати у різних діапазонах частот. В іншому дослідженні [94] реконфігурований носій прилад міліметрового діапазону (MMW) антена, що покриває діапазон 20,7-36 ГГц у різних конфігураціях комутатора. Антена була надрукована на підкладці LCP із використанням технології струминного друку. Діелектричні показники PDMS були у V- і W-діапазонах були перевірені та випробувані [2, 95].

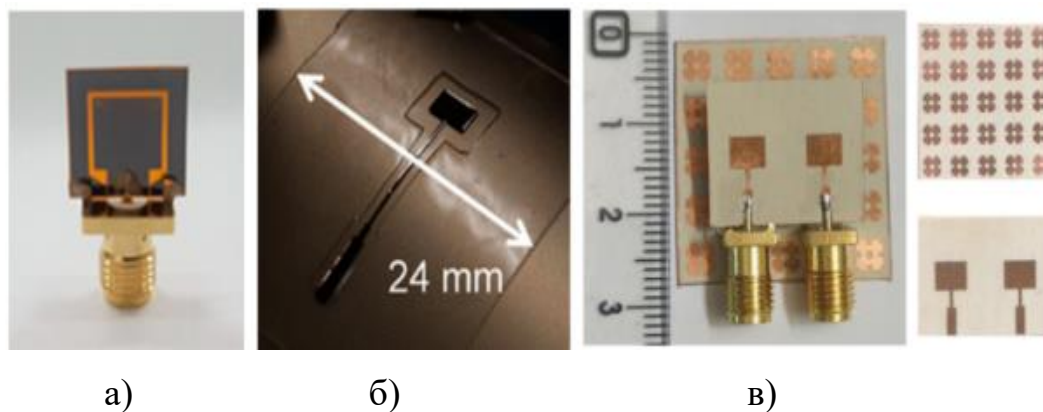


Рисунок 1.11 – Гнучкі антени додатків вище 12 ГГц. (а) Прототип графенової антени для додатків 5G [189]; (б) прототип планарної антени міліметрового діапазону на підкладці PDMS [195], та (в) електромагнітна заборонена зона (EBG) міліметрового діапазону з кількома входами та виходами

(MIMO) антена для носіння [96]. Мікромашинна мікросмужкова патч-антена була розроблена в діапазоні 60 ГГц на PDM субстрат для оцінки та порівняння цієї технології з альтернативною (рис. 1.11,б). Гнучкий антенна решітка міліметрового діапазону має смугу пропускання 26–40 ГГц із піковим посиленням 11,35 дБі на частоті 35 ГГц та постійний профіль високого посилення, що перевищує 9 дБі у всьому Ka-діапазоні [25]. Структурована антена MIMO міліметрового діапазону з електромагнітною смугою пропускання (EBG), що працює на частоті 24 ГГц. (Діапазон ISM), придатний для пристроїв, був запропонований в [96] на гнучкій підкладці Роджерса (рисунок 1.11,в). Параметри антени вивчалися як у відкритому космосі, так і на фантомі людини під вигин. Пропонована антена підходить для пристроїв, що носяться в міліметровому ді-

апазоні завдяки своєму проста геометрія та відмінні характеристики при згинанні та носінні на тілі [2].

1.5 Мініатюризація гнучкої друкованої антени

Бажання підключити всі електронні пристрої до IoT прискорило потребу в інтегрованих гнучкі антени меншого розміру. В результаті кількість досліджень малих антен збільшилась. Основна проблема для дослідників у цій галузі - зменшити розмір антени, щоб інтегрувати з мініатюрними пристроями без шкоди для параметрів продуктивності антени, таких як узгодження імпедансу, посилення, смуга пропускання, діаграма спрямованості та ефективність. Хоча це непростий і непросте завдання, дослідники знайшли низку творчих підходів до зменшення розмірів антени у літературі пропонуються різні способи зменшення габаритів антени. Основна увага приділяється методам зменшення форм-фактору гнучких антен. Застосовувані методи можна розділити на три групи: мініатюризація на основі матеріалів, мініатюризація на основі топології та використання структур з електромагнітною забороненою зоною (EBG). Перша методика зменшення розмірів гнучкої антени полягає у використанні матеріалів із високою відносною діелектричною проникністю. Робоча частота залежить від діелектричного середовища антени. Більш високе значення діелектрична проникність (k), тим менший розмір антени. У більш ранній роботі [97] автори запропонувала антену на основі композитних нанодротів та нанопапери зі срібла з дуже високою діелектричною проникністю постійна $k = 726,5$ на частоті 1,1 ГГц стала, $k = 726,5$ на частоті 1,1 ГГц. Це значення k було набагато вище, ніж у типової гнучкої підкладки, що використовується для гнучкої антени, такий як поліетиленнафталат (PEN) з $k = 3,4$, поліетилентерефталат (PET) з $k = 3,1$ та поліамід (PI) з $k = 3,4$. Згідно з цим дослідженням, використовуючи запропоновані композит на основі нано дроту як підкладка зменшив розмір антени приблизно вдвічі. Також було проведено термічні випробування, які показали при-

датність композиту зменшення габаритів гнучкої антени. Цей метод застосовується у багатьох інших дослідженнях [98–10]. У дослідженні [91] зменшення розміру антени використовувалася локально заповнена підкладка з високої діелектричною проникністю. Зменшення розміру антени на основі зміни топології – популярний підхід. Зміна геометрії, розподіл щільності струму та електричні розміри змінюють властивості антени. Оптимізація необхідна забезпечення певних властивостей антени. Є різні звивини-лінії, що використовуються для збільшення електричної довжини та мініатюризації гнучкої антени. У більш ранньому дослідженні [92], асиметрична меандрова лінія використовувалася зменшення розміру гнучкої антени і збільшення коефіцієнта посилення. У більш ранньому звіті [93] представлено компактну дводіапазонну гнучку антену, в якій використовувалася меандрова лінія для зменшення розміру антени та отримання дводіапазонних характеристик. Фрактальна антена може забезпечити такі характеристики, як велика антена з меншим розміром через ефективне використання площі. Завдяки застосуванню фрактальної геометрії Мінковського мініатюризація була досягнута в електротекстилі, що носить антену [94]. Ультратонка гнучка антена, що складається з прямокутних фрактальних плям із заглишкою була продемонстрована у [95]. Було показано, що ця прямокутна фрактальна пляма досягає 30% мініатюризації [2].

В порівнянні з традиційною чотирикутною фрактальною нашивкою. Дефектний наземний літак був прийнятий як метод управління посиленням, випромінюванням та розмірами антени. Компактна антена, що носить з подвійною гнучкою підкладкою була розроблена з цією концепцією [96]. Пази для травлення або друку на гнучкій підкладці – це ще один спосіб маніпулювати характеристиками гнучкої антени [71, 77, 78] показав компактну гнучку антену з прорізами у патчі. В іншому дослідженні [79] килим Серпінського була представлена фрактальна антена на основі щілинної діаграми Гільберта. Короткі стійки та різучі пази два інші поширені методи, які використовувалися в багатьох дослідженнях [10–13]. Крива заповнення простору (SFC) – популярний метод зменшення розміру антени [14]. У більш ранньому дослідженні [15] ав-

тори об'єднали ці два методи мініатюризації з порожниною хвилеводу цілісності підкладки половинної моди для зменшення розмір антени далі. Нещодавно розроблені структури з електромагнітною забороненою зоною (EBG) привернули увагу за їх можливість зменшити фізичну структуру антени без шкоди ефективності випромінювання. При проектуванні застосовувалися штучні магнітні провідники (АМС) та поверхні з високим опором (HIS) [16] низькопрофільні антени. Перша антена, що носить на основі EBG, була представлена раніше [17]. Незважаючи на те, що він був розроблений як антена, що носить, антена не побудована на гнучкій підкладці. Однак це дослідження показує, що вперше, як увімкнути поверхню EBG, щоб зменшити розмір антени. АМС на основі гнучкості Антена М-подібної форми була запропонована [18] (рис. 1.12,в) для додатків телемедицини, в яких використовувався поліімід. Каптон гнучкий матеріал як підкладка. Структура АМС допомагає ізолювати випромінювання антени та людська тканина; крім того, це зменшує неузгодженість імпедансу, викликане діелектричною проникністю користувача тіло. Текстильна антена EBG, що носить, була розроблена в [19], де флісова тканина використовувалася в якості субстрат. Тут поверхня EBG покращила пропускну здатність майже на 50%, а зменшення Розмір антени близько 30%. Також автори досліджували жорсткість антени при різних згинах, умови та їх вплив на смугу пропускання імпедансу Завдяки успіху цієї роботи дослідники розширив дослідження з інтеграції EBG в антену для розробки компактної антени з високими характеристиками. у наступних роботах [20-29] (рис. 1.12,а). Фотонні заборонені структури (ФЗЗ), інша форма EBG може перешкоджати поширенню певної довжини хвилі через свою періодичну природу. PBG – це 3-D структура з накладеними одна на одну шарами EBG. Зазвичай це комбінація багат шарового металу та штативу. У більш ранній роботі [30] показано вплив матеріалу PBG на звичайну антенну систему та спосіб зменшити розмір антени без шкоди для ефективності випромінювання, посилення та імпедансу пропускна спроможність. Також автори продемонстрували нову гнучку антену із використанням запропонованого матеріалу PBG. Періодична структура PBG використовувала-

ся в конформній антені та ґратах для придушення поверхневої хвилі поширення [31] (рисунок 1.12,б). Показано, що він допомагає зменшити вплив випромінювання на циліндричні кривизна, яка має впливати на резонансну частоту. Коефіцієнт посилення та спрямованість антени були покращені за допомогою PBG [2].

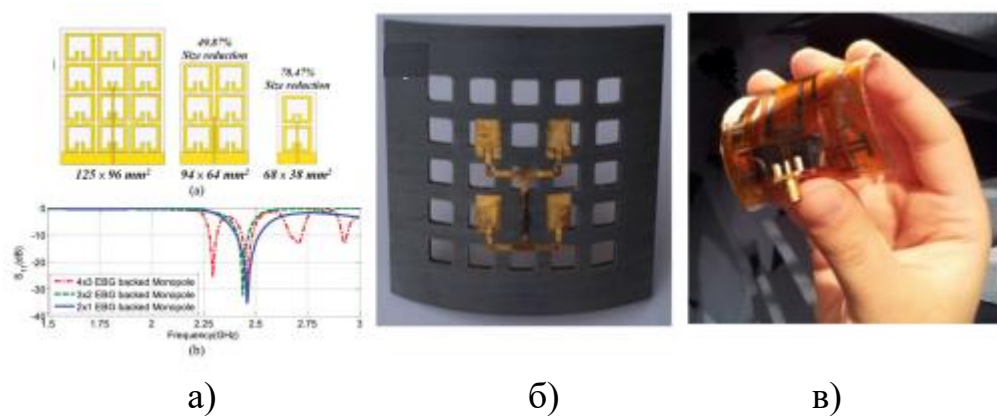


Рисунок 1.12 – Мініатюрні антени: (а) Мініатюризація монопольної антени на основі EBG з відображенням коефіцієнт [22], (б) виготовлена циліндрична конформна антенна решітка з фотонною забороненою зоною (ФЗЗ) ґрати [31], та (в) прототип М-подібної друкованої монопольної антени та Єрусалимський хрест з прорізами, (JC) -штучний магнітопровід (АМС) [18]

1.6 Гнучкі друковані антени для медичних імплантів

В останні роки безперервний розвиток та революція систем охорони здоров'я у напрямку просування ефективної системи підвищення якості життя, а також впровадження майбутнє IoT у медичному секторі. Імпантована антенна система передає та зберігає записані фізіологічні параметри, умови спілкування у часі. Отже, гнучкі антени відіграють величезну роль в імпантованих антенах, і вони привертають значну увагу дослідників і таким чином стали предметом поточних досліджень. Гнучкі антени абсолютно необхідні, оскільки більшість із них виготовлені з полімерного субстрату, який може бути біосумісним за своєю

природою. Для створення антени, що імплантується, основними вимогами є невеликий розмір і належна розміщення всередині людського тіла, велика пропускна здатність, гнучкість та низький питомий коефіцієнт поглинання (SAR). Це також складно через різну діелектричну проникність різних тканин та органів людини. тіло. Гнучка складчаста щілинна дипольна антена вбудована в PDMS для імплантації в тіло людини проводилася у попередньому дослідженні [32] (рис. 1.13,а). Характеристики антени та вимірювання SAR проводилися з використанням рідини, що імітує людську м'язова тканина з різними номінальними значеннями діелектричної проникності, що імітують різні тканини [2].

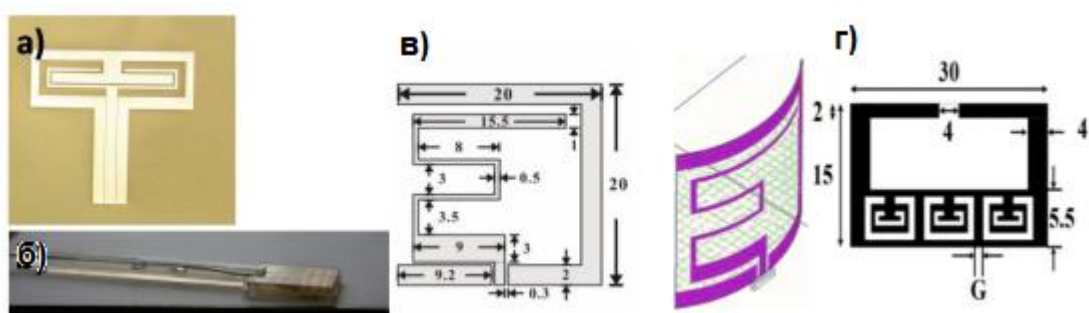


Рисунок 1.13 - Імплантовані антени: (а) Імплантована щілинна антена, (б) вбудована в PDMS [32], (в) геометрія антени з низьким питомим коефіцієнтом поглинання (SAR) та її прототипу [33], та (г) геометрія гнучка імплантована рамкова антена з додатковим кільцевим роз'ємним резонатором (CSRR) [34]

ЕМ характеристики антени виявилися стабільними для різних властивостей довкілля тканини. Випробування на гнучкість проводилися шляхом вигину антени за двома різними радіусами кривизни, що трохи зрушило резонансну частоту в межах смуги пропускання. Широкопasmовий імплантований низький Антена SAR на гнучкій підкладці PDMS була запропонована раніше [33] (рисунок 1.13,б). Унікальний дизайн особливості антен була відповідальною за досягнення низького SAR. Гелі для імітації свинячої корейки та м'язів були використані для експериментів з особливостями антени. Аналіз вигину антени показав невелике відхилення частоти плоского стану. Запропоновано кільцеву щілинну антену, що імплантується, в діапазоні частот ISM з використанням заземленого

метаматеріал у [71]. Ця антена була перевірена в гелі, що імітує тканини людини, та зразок курячої тканини. Середні значення SAR для антени знаходяться в безпечному діапазоні для з використанням багатошарової структури метаматеріалу. Антена показала кращу відносну смугу пропускання та коефіцієнти посилення в порівнянні з іншими антенами, що недавно імплантуються. Зворотні втрати антени було повністю знайдено без змін під час випробування на згин. Значення SAR для гнучких антен відносно вищі ніж типові імплантовані антени. Тому створення гнучких імплантованих антен є досить складним завданням. Багатосмугові програми, що імплантуються в діапазонах MedRadio та ISM були розглянуті в більш ранньому стаття [34] (рисунок 1.13,в). У цій антені був введений додатковий резонатор із роз'ємним кільцем (CSRR) для зменшення ефективності та посилення антени. Прототип антени був виготовлений із мідного листа, і продуктивність вимірювалася з використанням свинячого фантома [2].

1.7 Гнучкі друковані антени для програми, що змінюється

Телекомунікації та мікроелектроніка внесли низку переваг в області медичні програми. Медичні пристрої (IMD), що замінюються, є важливими компонентами додатків Інтернету речей у медичних галузях. В результаті для пристроїв моніторингу та системи доставки ліків та моніторингу внутрішній стан пацієнта, необхідні спеціальні типи гнучких антен. Бездротові IMD широко використовуються для діагностичних цілей, зокрема, для візуалізації шлунково-кишкового тракту (ЖКТ) [35]. Оскільки органи травлення у шлунково-кишковому тракті мають різні електричні властивостей, антени цих додатків повинні мати широкосмугові характеристики. В останні роки, Повідомлялося про різні антени для бездротових систем. Однак важкі метали в основному використовуються для виготовлення цих антен, які потенційно небезпечні для здоров'я людини, коли перелом капсули. Таким чином, водні антени здаються безпечнішими при діагностиці та лікуванні. Бездротова капсула Ендоскопія (WCE)

– це медичний метод, що дозволяє записувати зображення травного тракту [36] (рисунок 1.14). Цей метод має низку переваг у порівнянні з традиційними методами, такими як езофагогастродуоденоскопія або колоноскопія. WCE безболісний і неінвазивний. Система WCE містить антену, яка пропонує широкую смугу пропускання для сканування різних ділянок тонкої кишки [2].

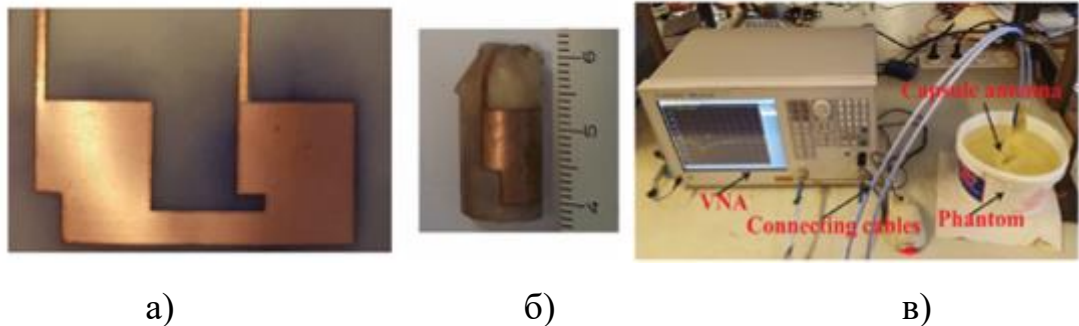


Рисунок 1.14 – Антена для вживання (а), виготовлена капсульна антена (б) та вимірювання налаштування за допомогою векторного аналізатора (в) ланцюгів Agilent e5063A [36]

Була запропонована всеспрямована конформна мала рамкова СШП антена, що працює на частоті 433 МГц для капсульних ендоскопічних систем з передачею відеозображення в реальному часі зсередини назовні тіло [36]. Пропонована антена була виготовлена на підкладці Preperm 255 з використанням міді та підтримувала бажану продуктивність при різній глибині імплантату та різних типах тканин. Компактний (30 мм^2), конформна антена з диференціальним харчуванням на ультратонкій поліімідній підкладці (Рисунок 1.15) у діапазоні ISM 915 МГц (902–928 МГц) для моніторингу внутрішньої температури тіла та біомедичне застосування було представлено у більш ранньому звіті [37]. Інтегрована капсульна система була експериментувала із кубічним однорідним м'язовим фантомом. Капсула меншого розміру з диференціальною мережею концепція, відсутність контактів, що закорочують, принесло бажані переваги, такі як нечутливість антени налаштування продуктивності, простота виготовлення та зниження впливу на сусідні схеми. Останнім часом, електрично мала ширококу-

гова антена на кремнієвій підкладці для бездротової капсульної ендоскопії (WCE), що працює на частоті 915 Гц, було представлено в ранньому звіті [38] (рисунок 1.16). Антена продуктивність була задовільною з різними тканинами через його широку смугу пропускання, і він також був протестований із рідкою сумішшю, що імітує фантом товстої кишки на частоті 915 МГц. Ця робота відкриває шлях до вдосконалення доступний WCE за рахунок підтримки радіоканалів із вищою швидкістю передачі даних [2].

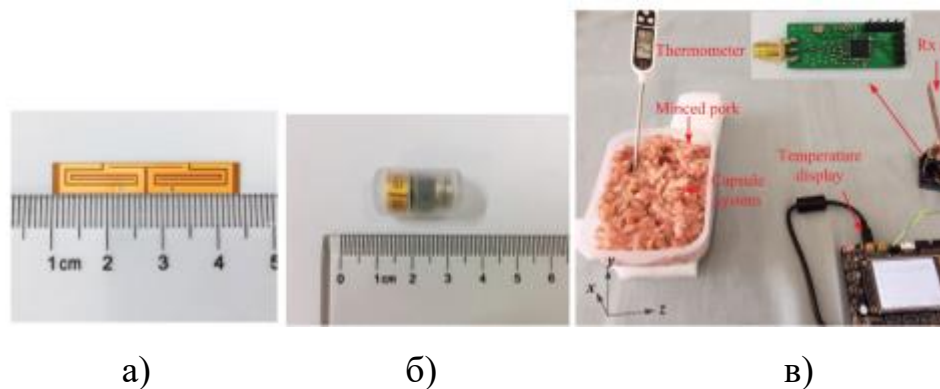


Рисунок 1.15 – Прототипи антени для біомедичних додатків: (а) пропонується антена, (б) інтегрована капсульна система та (в) вимірювальна установка системи зв'язку [37]

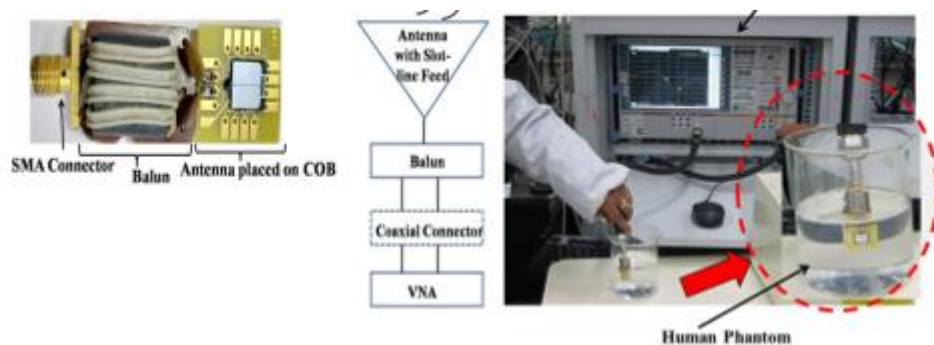


Рисунок 1.16 – Антена для бездротової капсульної ендоскопії (WCE): антенний вузол (а) і вимірювальна установка (б) для виготовленої антени [38]

1.8 Характеристики різних типів гнучких друкованих антен

Характеристики антени залежить від різних параметрів, таких як провідність випромінювання елемент, діелектричні підкладки та різні конструктивні особливості. Випромінює з високою провідністю елемент забезпечує чудове посилення, ефективність та смугу пропускання антени. Вибір відповідного діелектрика матеріал має вирішальне значення до роботи антени. Повідомляється, що ефективність та вираш знижуються для більш високої значення тангенса кута втрат діелектричної підкладки [39]. Крім того, діелектрична проникність (ϵ_r) впливає на смуга пропускання та резонансна частота антени. Підвищене значення діелектричної проникності дозволяє антені мініатюризація із зменшеною шириною смуги імпедансу та низькими радіаційними втратами [39]. Товщина підкладки - ще один фактор, який може впливати на ефективність, посилення, смугу пропускання та спрямованість. Для гнучкого антени, вибір правильної підкладки завжди є компромісом з урахуванням товщини, характеристик та гнучкість одночасно. Крім перерахованих вище факторів, конструкція патча антени, Зміни антенних решіток і лінії передачі з поділом потужності сильно впливають на характеристики антени. Патч-елементи бувають різної форми, такі як прямокутні, квадратні, круглі, кільцеві, трикутні, п'ятикутні, квадратні або круглі з порушеними усіченнями [40]. Ці форми впливають на поляризацію шаблони, резонансні частоти, поворотні втрати, посилення та спрямованість. Комп'ютерне проектування (САПР) програмне забезпечення необхідно у поєднанні з вирішувачем електромагнітних хвиль для ітеративної оцінки конструкція та змодельована антена з різними комбінаціями випромінюючих матеріалів та підкладок. Гнучкість і вигин через механічну напругу при вимірюванні на тілі необхідно оцінити на роботу будь-якої гнучкої антени у реальній ситуації. Гнучкі антени мають пройти механічна деформація, наприклад, вигин або розтяг. Це погіршує характеристики антени, наприклад зсув частоти, зміна посилення та діаграми спрямованості, а також зміна поляризації антени для передбачуваний додаток. Для ефективною реалізації Інтернету речей прийнятна продуктив-

ність гнучких антен необхідно. Дослідження все ще продовжуються, щоб знайти творчі способи покращення характеристик антени у стані напруги чи вигину. Вплив механічної напруги на компактну мікрополоскову антену на полііміді, що настроюється. Підкладка була досліджена шляхом проведення випробувань на вигин та розтягування [33]. Антена похилилася на стиск з мінімальним радіусом кривизни 86 і 150 мм по осі x та осі y, що призвело до максимального збільшення резонансної частоти на 3,1% та 1,3% відповідно. Подібним чином, гнучка на розтягування проводилася з мінімальним радіусом кривизни 79 та 162 мм за довжиною. по осі абсцис та осі ординат, що призвело до максимального зниження резонансної частоти на 4,2% та 0,3% відповідно (рисунок 1.17). Загальне зменшення резонансної частоти на 0,9% було виміряно для прикладеної деформація 0,09% при розтягуванні антени на осі y [2].

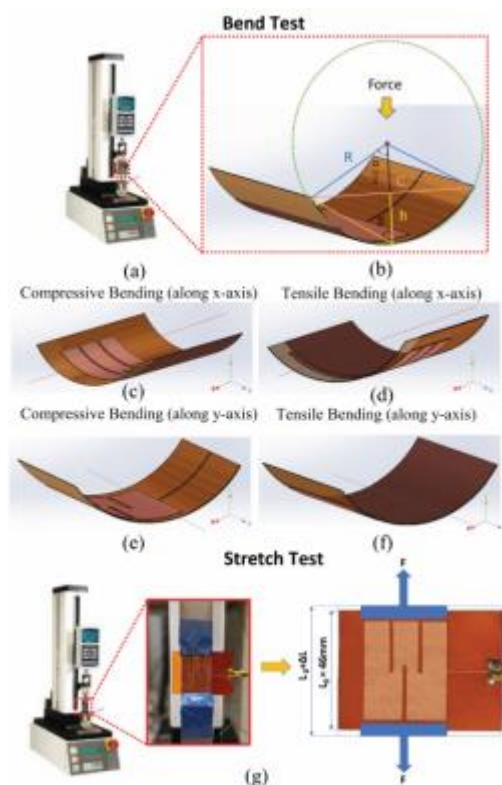


Рисунок 1.17 – Експериментальний процес вигину та розтягування антени при стисканні та розтягуванні вісь x та вісь [33]

Також було проведено випробування на адгезію виконується для перевірки зчеплення антени із підкладкою антена, що реконфігурується, для бездротових пристроїв WLAN / WiMAX була виготовлена і протестована як для плоских та вигнуті геометрії різного радіусу з добре збереженими радіаційними характеристиками [73]. Ефект про вигин антени в напрямках x і y повідомлялося в [74] для дводіапазонних, що реконфігуруються поляризована монопольна антена. Чисельне та експериментальне дослідження впливу вигину на характерні параметри гнучка надширокопasmовога антена (UWB) з тонкого полімерного листа PEDOT на липкій стрічці повідомлялося раніше [52]. Характеристики антени, включаючи S-параметри, поляризацію та випромінювання візерунки були досліджені на предмет кутів вигину від 0° до 180° (рисунок 1.18). Хоча робота антени виявилася задовільною навіть при великих кутах вигину, напрямок поляризації був змінений [2].

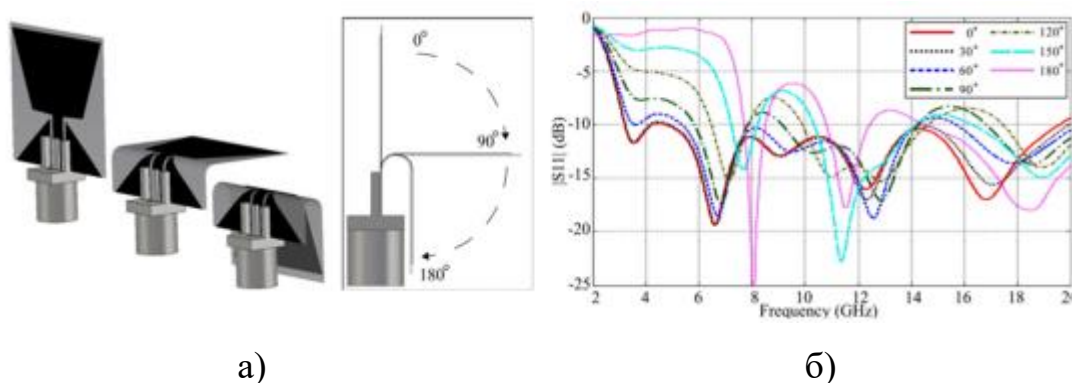


Рисунок 1.18 – Вплив вигину на характеристики антени: (а) встановлення 3-D вигину та визначення кут вигину в НВЧ студії CST, та (б) змодельований $|S_{11}|$ для різних кутів вигину [52]

Конфігурація антеної решітки [91] показала поворотні втрати понад 15 дБ на обох частотах групи. Більш високу крос-поляризацію можна поліпшити, використовуючи різні мережі живлення на обох рівнях. Щоб продемонструвати гнучкість та механічну стійкість антенних решіток, вони були вигнуті кілька разів і перехарактеризував. Зворотні втрати та діаграми спрямованості не змінилися в межах повторюваність вимірювального обладнання. Змодельовані та

виміряні дані про характеристики антени міліметрового діапазону та її антенних ґрат щодо ширини смуги імпедансу, діаграми спрямованості та реалізованого посилення для лазерного друку та процеси струминного друку в К-діапазоні (26-40 ГГц) повідомлялося раніше [92]. Аналіз відповідності антени вироблялося вигином по циліндричній поверхні різного радіусу тільки для коефіцієнт відбиття Мікромашини ефективний параметр (рис. 1.19) [2].

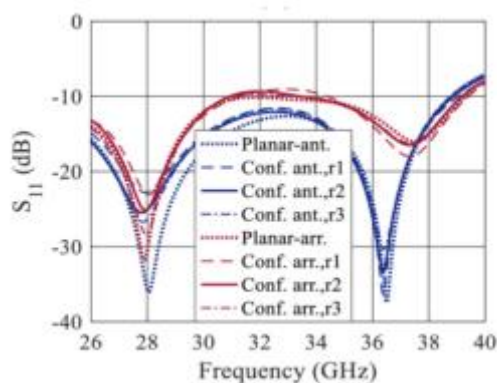


Рисунок 1.19 – Порівняльні зворотні втрати плоскої та конформної конфігурації антен уздовж циліндричної поверхні радіусів, $r_1 = 6$ мм, $r_2 = 8$ мм, $r_3 = 10$ мм [92]

Незважаючи на те, що багатоспрямовані антени Yagi-Uda з високим коефіцієнтом посилення та багатоспрямовані антени для використання в діапазоні 24,5 ГГц були надруковані на струменевому друку. Діапазон ISM був виготовлений на гнучкій підкладці LCP, характеристики антени для конформної додаток не вивчався [15]. Очікується, що параметри характеристик антени зміняться через взаємодії із втраченими тканинами людського тіла. Отже, діелектрична проникність тканин людини та різні значення провідності впливають на коефіцієнти відображення, впливають на потужність, що поглинається тілом, та зменшити ефективність випромінювання антени [41]. Крім того, питома швидкість поглинання (SAR) обмеження необхідно враховувати при розробці переносної/гнучкої антени. Межа SAR регулюється для пристроїв, що носяться, у тому числі антени, які визначають кількість електромагнітного випромінювання, яке людське тіло може безпечно витримувати без будь-якої небезпеки для здоров'я та визначається як потужність, що споживається на одиницю маси тканини [42].

Нова мініатюрна текстильна антена з вбудованим хвилеводом (SIW) на підкладці з порожниною про роботу на частоті 2,45 ГГц повідомлялося раніше [32]. У цій роботі ефекти вигину антени враховувалися при розрахунку коефіцієнта відображення, посилення 5,28 та 5,35 дБі та ефективності 73% і 74,3% у вільному просторі і на тілі, що підходить для гнучких пристроїв програми. Значення SAR для стегна, плеча та грудей склали 0,297, 0,358 та 0,380 Вт/кг, відповідно, які були менше 2 Вт/кг, що є європейською межею. Недорогий широкосмуговий текстиль. Антена за технологією SIW на вовняній повсті була представлена в попередній статті [30]. За результатами моделювання значення SAR антени були знайдені нижче за американські та канадські межі 1,6 Вт/кг у середньому. Рекомендувалося використовувати цю антену для пристроїв, що носяться, таких як куртки без прямого контакту із тілом людини. Носіма кругла кільцева щілинна антена 2,28-2,64 ГГц мала максимальне посилення 7,3 дБі в ISM діапазон, а ефективність варіювалася від 50% до 60%, і більше 70% з електромагнітним діапазоном метод розриву (EBG) [43]. Працездатність антени досліджували, поміщаючи її різні частини людського тіла: руки, коліна та живіт. На рисунку 1.20 показано експериментальне встановлення пропонованої антени та параметр S_{11} пропонованої антени у цих умовах. Значення SAR з EBG структура виявилася рівною 0,554 Вт/кг, що відповідає вимогам SAR за стандартами США [2].

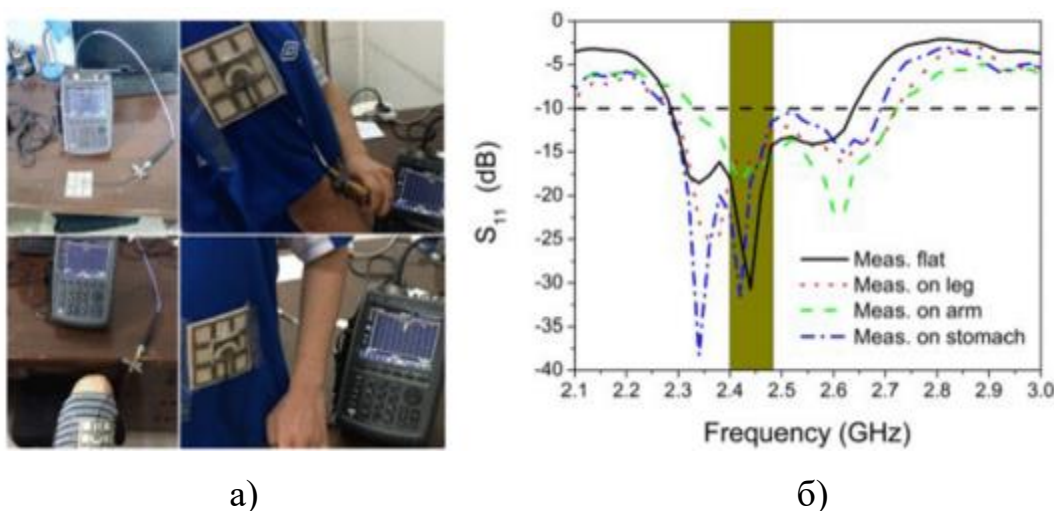


Рисунок 1.20 - Вимірний S_{11} пропонованої антени, поміщеної на тканину людини. (а) Вимірювальна установка та (б) криві S_{11} [243]

Двохдіапазонна тканинна патч-антена забезпечувала гарне покриття для робочих діапазонів WLAN за технологією SIW на повстяній підкладці [44]. Антена вигинається з різним радіусом вигину, щоб перевірити виступи. Сумарний ККД масиву в нижньому та верхньому діапазонах склав 55% та 60% відповідно. Середня ефективність була спричинена втратою текстильного матеріалу. Тим не менш, верхня смуга антени забезпечує хорошу ізоляцію на рівні -35 дБ, що робить її придатною для програми MIMO. Значення питомого коефіцієнта поглинання (SAR) на моделі людського тіла, яке було 0,067 Вт/кг, що набагато нижче граничного значення 2 Вт/кг європейського стандарту. Для цільнотканинної круглої кільцевої щільної антени використовувався фантом, еквівалентний двом третинам м'язів з метою перевірки працездатності на тілі людини [45]. Зовнішні дії не змогли впливають на характеристики зворотних втрат антени через структуру фідера SIW, що підтримується резонатором, включаючи навколишнє середовище, закріплене на одязі, та людське тіло. На рисунку 1.21 показано моделювання та вимірювання антени для встановлення різного радіусу вигину. Ефективність випромінювання та виміряне пікове посилення складало 37,7% і 3,12 дБі, відповідно, що було прийнятно додатків ISM. Випромінювальна характеристика запропонованої антени нечутлива до фантомного ефекту. В іншому звіті [46] характеристики надширокопосмугової (СШП) антени були досліджені за допомогою зміна товщини та діелектричної проникності підкладки, а також вигин по циліндричній конструкції радіусом 10 та 20 мм. Було виявлено, що немає великої різниці у пропускну здатності та пропускну здатності ефективності антени в плоских та вигнутих корпусах, що дозволило використовувати її у складному Wireless Wide термінали мережі (WWAN), пристрої WBAN та медичні датчики. Випуклі та увігнуті аналіз вигину проводився на багатосмуговому струменевому принтері (охоплюваний GSM 900, GPS, UMTS, WLAN, ISM, Bluetooth, LTE 2300/2500 та WiMAX) для характеристики гнучкості [47]. Для обох типів конфігурації зсув частоти був не таким значним, невелике збільшення частоти посилення через невелике піднесення спрямованості не спостерігалось. Жодної значної деградації виявлено не було, та загальна продуктив-

вність була задовільною для різних бездротових додатків для майбутнього конформного та гнучкого мікромашини електронні пристрої [2].

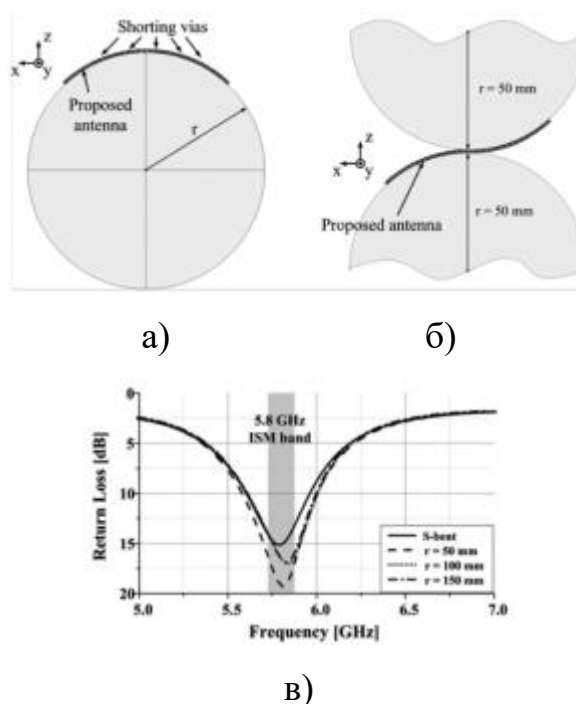


Рисунок 1.21 – Моделювання вигину антени: налаштування згинання (а), встановлення S-подібного згину (б) та показники поворотних втрат (в) [245]

Конструкція антени для широкосмугової роботи робить її стійкішою до зсуву частоти через вигин. Якщо антени призначені для широкосмугової роботи, їх резонансна частота залишатися у межах необхідної робочої зони навіть після вигину [27]. По-друге, симетричної форми антени менше схильні до вигину в різні боки. Аналіз вигину необхідний для перевірки довговічність чи надійність антен. Було проведено повторні випробування на вигин для перевірки фізичного стану деформації, розриви або тріщини на провідній частині антени. Через фізичний деформації або тріщини на випромінюючому елементі, зміни щільності струму, які змінюють антену поляризація у дії. Для фізичних деформацій, що носяться антен, збільшують значення SAR. Мініатюризація антен може запобігти фізичним спотворенням або тріщинам через вигин [2].

1.9 Переваги та недоліки гнучких друкованих антен

Останнім часом дослідження гнучких бездротових пристроїв привернули велику увагу через їх природу, щоб відповідати вимогам біомедичних додатків, автомобільних навігаційних систем, пристрої, що носяться і т. д. Антена - один з ключових компонентів всієї системи, що забезпечує конформність пристрою, вона повинна бути гнучкою і розтягується. Перший крок до цієї мети - замінити звичайні жорсткі підкладки гнучкими матеріалами, такими як текстиль, папір або еластомери такі як полідиметилсилоксан (PDMS) [51], PEN, PET та PI. Таким чином, можна сказати, що саме перша проблема розробки гнучкої антени - знайти підходящу підкладку. Порівняно з традиційні підкладки, такі як FR4 або Rogers, з діелектричною проникністю близько 3-10 та тангенс кута втрат 0,001-0,02, типові гнучкі підкладки мають низьку діелектричну проникність. Незважаючи на те, що це низьке значення діелектричної проникності допомагає досягти більшої смуги пропускання та ефективності випромінювання, це створює проблему (характеристики антени), коли потрібна мініатюризація. Для гнучких тканинних антен нерівномірна товщина – ще одна проблема, з якою потрібно мати справу. Електротекстильна основа схильна до розсіпання та сприйнятливий до абсорбції рідини. Гнучка антена на паперовій основі стикається з аналогічними проблемами з відносно високим коефіцієнтом втрат [100], що призводить до низької ефективності антени та неузгодженості імпедансу. У ранній роботі [64] органічний представлена паперова СШП антена. Хоча це низькопрофільна антена, це неправильний вибір для додатків, що вимагають високих рівнів вигину та скручування через неоднорідності та відсутність надійності. Підкладка на основі полімеру – відмінний варіант для вирішення цих проблем. Наприклад, у більш ранньому звіті [86] вивчалася компактна антена на основі поліїмиду, на яку була нанесена поліїмідна плівка з каптону використовується через низький тангенс кута втрат ($\tan \delta = 0,002$) для ширококугової роботи з фізичними та хімічна гнучкість. Підкладка витримувала температуру до 400 °C і межу міцності на розрив 165 МПа при 73°F, що підтверджує міцність поліїмід-

ної плівки Kapton. Крім того, поліілід і Kapton не дуже дорогі через масове виробництво рулонів, будучи прозорими і згинається. У літературі описано багато інших конструкцій на основі полімерів [48, 50, 52-56]. Одна проблема, яка може виникнути через антену на полімерній основі - це надмірний вигин або скручування, яке може призводити до утворення мікротріщин у підставі. Це вплине на електричну провідність антени та підвищують ризик поломки. Крім того, низькі температури скла полімерів роблять їх непридатними для використання у високотемпературних додатках. Керамічні підкладки можуть бути альтернативою, здатною витримувати високі температури і може використовуватись у гнучких додатках [57]. Таке обмеження можна подолати за рахунок застосування дуже тонких металевих нанодротів на поверхню еластомери, такі як PDMS, щоб зробити його дуже провідним та розтяжним [47]. Через виготовлення та складність конструкції, він не дуже підходить для недорогих, гнучких додатків. Замість твердого металевий дріт, якщо рідкий метал (LM) використовується в мікрофлюїдному каналі, створеному еластомерами, він буде надати можливість реконфігурування антени, що є чудовою особливістю антени, яка потрібна в багатьох додатках. PDMS - найбільш популярні комерційні еластомери для створення мікрофлюїдного каналу для гнучких антена. Різні рідкі метали, такі як ртуть, вуглецеві нанотрубки (УНТ), галінстан, галій. Індій (GaIn) та евтектичний галій-індій (EGaIn) вводяться в канал для освіти антена [48-50]. Крім ПДМС, силіконовий каучук EcoFlex [61] та термопластичний поліуретан. (TPU) на основі NinjaFlex [24] також використовуються як еластомер для створення мікрофлюїдних каналів і є зазвичай тривимірні печатка для реалізації певного малюнка. Ще одна проблема розробки гнучких антен: визначення відповідних провідних матеріалів, які витримують різні умови вигину та скручування, та мають розумне значення опору, ніж впливати ефективність випромінювання антени. Різні методи мають вважалось, що можна знайти провідні підкладки, такі як хімічно модифікує поверхню тканини [62] або фізичне змішування декількох провідних матеріалів [63-65]. Майбутні гнучкі антени повинні відрізнятися низьким профілем, малими втратами, що легко інтегруються з ВЧ перед-

ньою панеллю кінцева система, здатність контролювати/керувати діаграмою спрямованості та, в кінцевому підсумку, кругова поляризація для ширша смуга пропускання. Незалежно від форми гнучкої антени, один із способів зменшити розмір антени структура призначена для використання більш високих частот діапазонів V (40-75 ГГц) та W (75-110 ГГц) [66]. Ця високочастотна операція забезпечить високопродуктивне з'єднання передачі даних. Матеріали з високі діелектричні постійні використовуються зменшення розміру антени [67, 68]. Найбільш загальний еластомірні матеріали мають низькі діелектричні проникності. Це низьке значення може бути збільшено шляхом змішування підкладка з матеріалами з високою діелектричною проникністю, такими як кераміка, така як $BaxSr1 - xTiO3$ [58], $BaTiO3$ [57], $NdTiO3$ [69], $MgCaTiO2$ [69], УНТ [70] та наночастинки [71]. Гнучка на основі метаматеріалу антена є відносно новою розробкою і знайшла своє застосування на комерційному ринку через його характеристики, такі як легка вага, надійність та реконфігурованість [49, 72-75]. Має потенціал бути дешевшим і менше. Спільне проектування антени та ВЧ системи на гнучкій підкладці зробило прориви в біомедичних пристроях, що імплантуються [32]. Удосконалення методів проектування та впровадження нових матеріалів допоможе зробити цю систему спільного проектування більш життєздатною для багатьох інших програм. Метаматеріал має природну здатність взаємодіяти з випромінюванням і перетворювати його з одного тип енергії до іншого. Ця особливість метаматеріалу може бути використана для гнучкої випрямної антени для одержання енергії збирання врожаю [2, 76, 77].

1.10 Висновки до розділу

Область гнучких друкованих антен цікава і має міждисциплінарний характер, включаючи електротехніку, матеріалознавство та машинобудування. Гнучкі антени - один із найважливіших компонентів у реалізації гнучких електронних пристроїв. Гнучка антена ідеальна для сучасних та майбутніх засобів бездротового зв'язку і сенсорних застосувань, насамперед через його легку та змен-

шену форму фактор, низька вартість виготовлення та здатність відповідати неплоським поверхням. Вибір матеріалів для антени виробництво засноване на перевагах програми, таких як середовище, безшовна інтеграція з жорсткими та нежорсткі пристрої, вартість та аспекти масового виробництва у процесі виготовлення. З високою провідністю матеріали, такі як чорнило з наночастинками Ag, мідна стрічка або покриття, що проводять полімери, вбудований PDMS провідне волокно та матеріали на основі графену зазвичай використовуються для реалізації провідних шаблони в антени. Поліімід каптону, ПЕТ, ПЕН, ПАНІ, рідкокристалічний полімер, електротекстиль та папір були переважно в якості гнучких субстратів. Застосування гнучких антен у різних частотних діапазонах нижче та вище частоти 12 ГГц свідчить про універсальність гнучких антен. Різні техніки мініатюризації мають обговорювалися разом із проблемами та обмеженнями. Гнучкі антени для біомедичних додатків з можливістю імплантації та прийому всередину показує перспективний характер електромагнітного пристрої у охороні здоров'я. Вигин, розтягнення та близькість до людського тіла впливають на гнучкість обговорювалися характеристики антен. Коригувальні заходи, такі як збільшення пропускної спроможності або симетрія спроектованої антени може допомогти врахувати відхилення, спричинені деформацією та інші хибні фактори. Нарешті, проблеми проектування та реалізації гнучкої антени було обговорено з урахуванням матеріальні проблеми для підкладки та провідного матеріалу. Гнучкі антени майбутнього бездротова система як частина IoT, VAN та біомедичних пристроїв була розглянута з посиланням на нова література. Останні дослідження гнучких антен із упором на стійкість електроживлення за рахунок обговорюється збирання енергії. Незважаючи на обмеження гнучких антен, ці нежорсткі пристрої можуть бути спроектовані для задоволення футуристичного попиту на компактне бездротове рішення, що підходить для поверхні будь-якої кривизни [2].

2 ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ДРУКОВАНИХ АНТЕН

2.1 Призначення та принцип дії друкованих антен

Антенa є необхідною сполучною ланкою між електромагнітними хвилями, що поширюються у вільному просторі, і коливаннями, генерованими передавачем або прийнятими приймачем. Як правило, антенa служить одночасно і для прийому, і для передачі, але в деяких випадках для цього можуть використовуватися окремі антени [40].

У більшості випадків потрібно антенa, яка концентрує випромінювану енергію у відносно малому просторовому куті або приймає енергію лише з деяких напрямків. Розміри таких антен менше кількох довжин хвиль. Надалі відмінності між прийомними та передавальними антенами не відзначаються, оскільки співвідношення, отримані для передавальних антен, в більшості випадків безпосередньо застосовуються і для приймальних антен, і навпаки [41].

Діаграма спрямованості (ДС) є основною характеристикою антени. Рівень сигналу, що приймається спостерігачем на вимірювальний зонд, залежить від положення спостерігача по відношенню до антени. Просторовий розподіл амплітуди вектора напруженості електричного поля, нормоване щодо максимального значення називається характеристикою спрямованості антени по полю. Перетин даної характеристики спрямованості будь-якою площиною, називають діаграмою спрямованості [42].

Як правило, антенa концентрує більшу частину енергії в одному напрямку. Головна пелюстка ДС являє область, в межах якої випромінюється або приймається велика частина енергії сигналів. Решта пелюсток ДС зазвичай називають бічними пелюстками через їх положення по відношенню до головної пелюстки. При проектуванні антенної системи не можна не враховувати структуру області бічних пелюсток ДС, які визначають параметри електромагнітної сумісності (ЕМС).

Зазвичай ДС визначають у головних площинах (Е і Н), пов'язаних з направленням поляризації електромагнітного поля. Для антен, жорстко пов'язаних із землею, ДС визначається в горизонтальній і вертикальній площинах [49].

Обмежена ширина головної пелюстки ДС робить приймальню антену пристроєм, чутливим до кутового положення відносно направлення сигналу, що надходить. Ступінь цієї чутливості можна оцінити шириною ДС антени. Ширина головної пелюстки (ширина ДС) найчастіше визначається між точками половинної потужності (на рівні - 3 дБ).

Здатність антени концентрувати енергію в певному напрямку називається спрямованою дією антени. Спрямовану дію антени характеризує коефіцієнт спрямованої дії (КСД), який визначається для направлення максимального випромінювання. КСД – це відношення максимальної щільності потоку потужності випромінювання до середньої щільності потоку потужності по всьому простору. Це значення КСД визначено щодо так званого ізотропного випромінювача. Проте в деяких випадках КСД оцінюють щодо півхвильового диполя [12].

Поляризацію антени визначають по напрямку вектора напруженості електричного поля, що формується антеною.

Є ряд інших параметрів антен, які необхідно враховувати при проектуванні антенних систем.

2.2 Параметри та характеристики передавальних і приймальних антен

Передавальна антена. Комплексна характеристика спрямованості передавальної антени по електричному полю в дальній зоні (рис. 2.1), тобто на відстані $r \geq 2A_{\max}/\lambda$ (A_{\max} – максимальний розмір антени, λ – довжина випромінюваної хвилі), описується виразом [1]

$$\vec{E}(\theta, \varphi) = E(\theta, \varphi) \vec{p}(\theta, \varphi) \exp[i\Phi(\theta, \varphi)] \quad (2.1)$$

де $E(\theta, \varphi)$, $p(\theta, \varphi)$ и $\Phi(\theta, \varphi)$ - відповідно амплітудна, поляризаційна і фазова діаграми спрямованості антени.

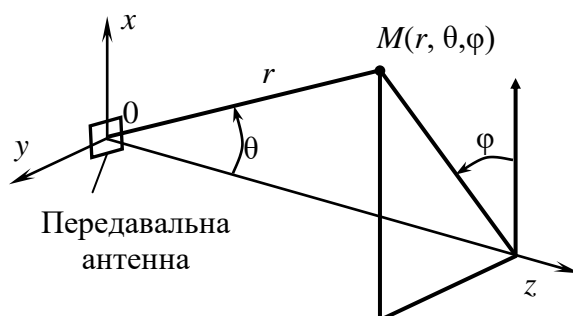


Рисунок 2.1 – Система координат, яка використовується при розрахунку ДС

Нормовані амплітудні ДС визначаються відповідно до співвідношень:

- по полю

$$F(\theta, \varphi) = \frac{E(\theta, \varphi)}{E_{\max}(\theta_m, \varphi_m)}; \quad (2.2)$$

- по потужності

$$F^2(\theta, \varphi) = \frac{E^2(\theta, \varphi)}{E_{\max}^2(\theta_m, \varphi_m)}. \quad (2.3)$$

Тут $1 / E_{\max}(\theta_m, \varphi_m)$ – нормуючий множник, а $E_{\max}(\theta_m, \varphi_m)$ - значення амплітуди вектора напруженості електричного поля в точці максимуму, θ_m, φ_m – кутовий напрямок на точку максимуму.

Часто ДН виражають у логарифмічному масштабі (в децибелах) [19]

$$F^2(\theta, \varphi) = 20 \lg F(\theta, \varphi) = 10 \lg F^2(\theta, \varphi). \quad (2.4)$$

Просторове зображення нормованої амплітудної ДС має вигляд, показаний на рис.2.2а. Для повноти уявлення ДС зазвичай цікавляться перетинами її в головних площинах: площині $\varphi = 0$ (крива 1) і площини $\varphi = \pi/2$ (крива 2). При цьому перетин ДС головною площиною, в якій коливається при поширенні вектор напруженості електричного поля, називається ДС в площині Е, а перетин головною площиною, в якій коливається при поширенні вектор напруженості магнітного поля – ДС в площині Н.

Плоскі перетини нормованих амплітудних ДС зображують як в полярних (рис. 2.2,б), так і в прямокутних (рис.2в,г) координатах, причому перший спосіб використовують переважно для побудови ДС слабонаправлених антен, а другий – гостронаправлених. З графічної побудови нормованих ДС визначають наступні параметри:

- коефіцієнт рівномірності ДС (у випадку слабонаправленої антени)

$$N = F_{\min}, \quad (2.5)$$

де $F_{\min}(\theta)$ – значення ДС в напрямку мінімального випромінювання антени (рис.2,б);

- ширину головної пелюстки (променя) на рівні 0,5 за потужністю (0,707 по полю або -3дБ в логарифмічному масштабі) $2\theta_{0,5}$ і на рівні нульового випромінювання $2\theta_0$, а також значення (рівень максимумів) бічних пелюсток $F_{q\max}$ та їх спрямування $\theta_{q\max}$ (у разі гостронаправленої антени, рис.2в,г), де q - номер бічної пелюстки.

Поляризація передавальної антени визначається напрямком вектора напруженості електричного поля. Найбільш загальним випадком поляризації є еліптична поляризація, яка повністю описується такими параметрами поляризаційного еліпса (рис. 2.3):

- кутом γ нахилу великої осі еліпса до осі θ_0 обраної системи координат ($0 \leq \gamma \leq \pi/2$); коефіцієнтом рівномірності (еліптичності) поляризації

$$K_e = \frac{b}{a}, \quad (2.6)$$

де b і a – мала і велика піввісь еліпса ($0 \leq K_e \leq 1$);

- знаком поляризації $\text{sgn}K_e$, який вказує на напрямок обертання кінця вектора напруженості електричного поля в площині еліпса при поширенні поля від антени, якщо «дивитися» йому вслід: $\text{sgn}K_e > 0$ – для правообертальної поляризації та $\text{sgn}K_e < 0$ – для лівообертальної.

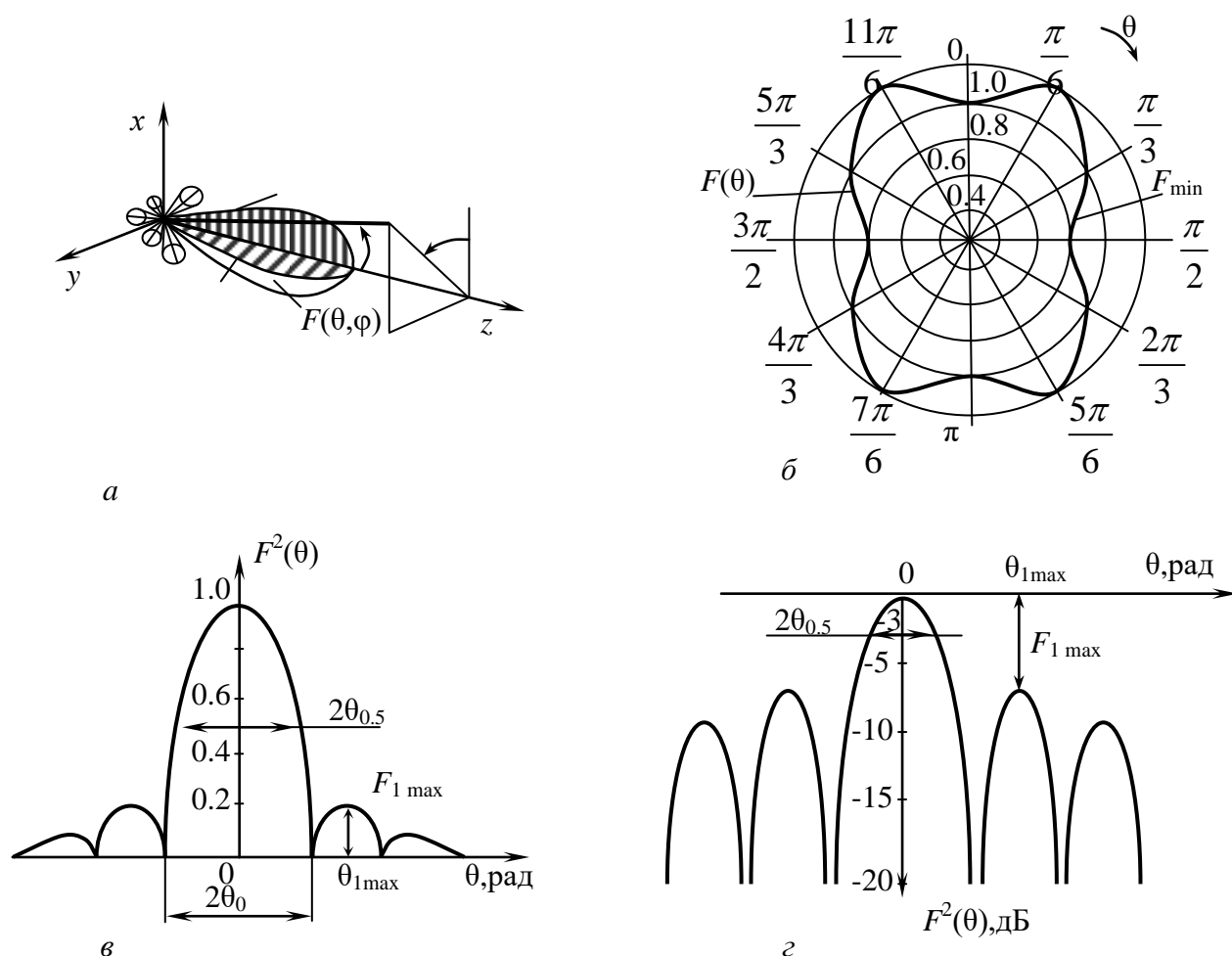


Рисунок 2.2 – Форми представлення ДС: а – об’ємна характеристика спрямованості; б – ДС в полярній системі координат;

в – ДС в декартовій системі координат з відносним масштабом;

г – ДС в декартовій системі координат з логарифмічним масштабом

Параметри поляризаційного еліпса (рис. 2.3) при відомих компонентах випромінюваного поля визначають за формулами [23]

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= 0,5 \operatorname{arctg} \frac{2m \cos \psi}{1 - m^2} \\ K_e &= 2m \sin \psi \left[1 + 2m^2 + \sqrt{(1 + m^2)^2 - (2m \sin \psi)^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

де $m = E_\varphi / E_\theta$ – відношення амплітуд ортогональних складових;

$\psi = (\arg E_\varphi - \arg E_\theta)$ – різниця фаз комплексних амплітуд цих складових.

Зворотні залежності [23]

$$\left. \begin{aligned} m &= \sqrt{\frac{(K_e^2 \operatorname{tg}^2 \gamma + 1)}{(K_e^2 + \operatorname{tg}^2 \gamma)}} \\ \psi &= \operatorname{arctg} \left\{ \frac{2K_e}{[(1 - K_e^2) \sin 2\gamma]} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Залежність коефіцієнта еліптичності від кутових координат точки спостереження характеризує поляризаційну діаграму антени: $p(\theta, \varphi) = K_e(\theta, \varphi)$.

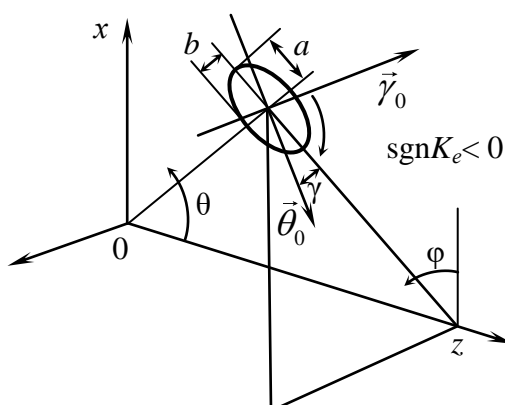


Рисунок 2.3 – Еліпс поляризації поля

Відомі амплітудні та поляризаційні діаграми передавальної антени дозволяє визначити її КСД. Для антени лінійної поляризації [23]

$$D = \frac{4\pi}{\left\{ \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \right\}} \quad (2.9)$$

Для антени кругової поляризації при однакових максимумах парціальних амплітудних ДС [24]

$$D = D_{\theta} + D_{\varphi} \quad (2.10)$$

де

$$D_{\theta} = \frac{4\pi}{\left\{ \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \left[\frac{F_{\theta}^2(\theta, \varphi) + F_{\varphi}^2(\theta, \varphi)}{m^2} \right] \sin \theta d\theta d\varphi \right\}}, \quad (2.11)$$

$$D_{\varphi} = \frac{4\pi}{\left\{ \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \left[m^2 F_{\theta}^2(\theta, \varphi) + F_{\varphi}^2(\theta, \varphi) \right] \sin \theta d\theta d\varphi \right\}},$$

Парціальні КСД для складових поля E_{θ} и E_{φ} . Тут $F_{\theta}(\theta, \varphi)$ и $F_{\varphi}(\theta, \varphi)$ – нормовані амплітудні ДС взаємно перпендикулярних складових.

На практиці широко поширена наближена оцінка КСД за формулою [56]

$$D \approx \frac{10}{2\theta_{0,5}^E \cdot 2\theta_{0,5}^H}, \quad (2.12)$$

де $2\theta_{0,5}^E$ і $2\theta_{0,5}^H$ – ширини променя антени на рівні 0,5 за потужністю в головних площинах, рад.

ККД передавальної антени знаходиться так

$$\eta = \frac{R_{\Sigma}}{(R_{\Sigma} + R_{\Pi})}, \quad (2.13)$$

де R_{Π} – опір втрат в антені, R_{Σ} .

Коефіцієнт підсилення антени визначається за формулою [47]

$$G = D\eta. \quad (2.14)$$

Діапазонні властивості передавальної антени характеризуються шириною смуги робочих частот $2\Delta f$, яка визначається в одиницях частоти або у відсотках до середньої частоти діапазону f_{cp} [72]

$$\frac{2\Delta f}{f_{\text{cp}}} = 2 \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{f_{\text{max}} + f_{\text{min}}} 100, \quad (2.15)$$

де f_{max} та f_{min} – максимальна і мінімальна частоти, або коефіцієнтом перекриття по частоті

$$K_{\Pi} = \frac{f_{\text{cp}} + \Delta f}{f_{\text{cp}} - \Delta f} = \frac{1 + \Delta f}{1 - \Delta f} \cdot \frac{f_{\text{cp}}}{f_{\text{cp}}}. \quad (2.16)$$

Приймальна антена. За теоремою взаємності приймальну антену характеризують ті ж параметри, що і передавальну. ЕРС (в вольтах), що збуджується в будь-якій приймальній антені, визначається за формулою

$$E_a = \frac{E\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{GR_a}{120}} F(\theta, \varphi) \cos \mu, \quad (2.17)$$

де E – напруженість електричного поля хвилі, що падає на антену, В/м; λ – довжина хвилі, м; G – коефіцієнт підсилення антени; R_a – активна складова вхідного опору антени, Ом; $F(\theta, \varphi)$ – нормована амплітудна ДС антени; μ – кут між площинами поляризації приймальної антени і хвилі, що приходить, рад.

Максимальна ЕРС, що наводиться у приймальній антені відповідає прийому з максимального напрямку ДС і повному погодженню антени з падаючим полем по поляризації:

$$E_{a \max} = \frac{E\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{GR_a}{120}}. \quad (2.18)$$

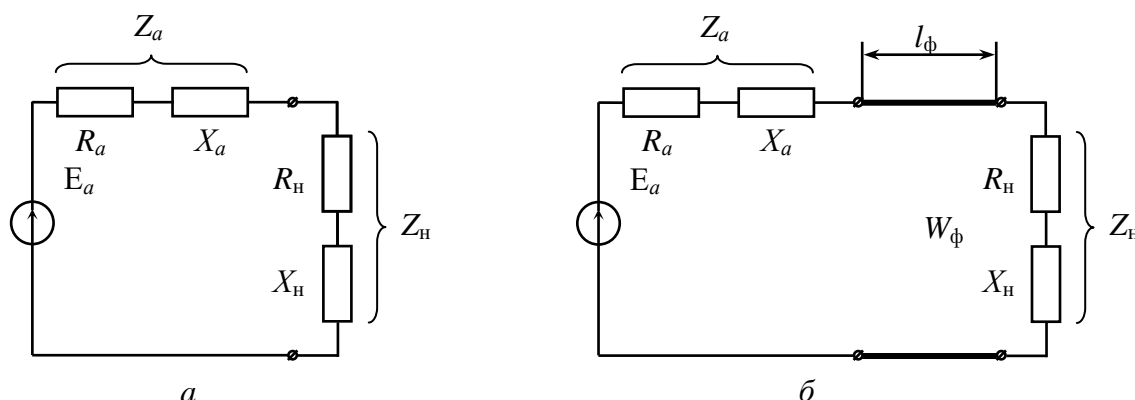


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема приймальної антени:

а – з безпосереднім включенням приймача;

б – при включенні приймача за допомогою довгої лінії

Максимально можлива (оптимальна) потужність (у ватах), що віддається приймальною антеною з вхідним опором $Z_a = R_a + iX_a$ в узгоджене навантаження (приймач) $Z_n = R_n + iX_n$, безпосередньо підключене до антени (рис.4,а), має місце при $R_n = R_a$, $X_n = -X_a$ і визначається за формулою

$$P_{\max} = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi r)^2}. \quad (2.19)$$

Потужність, що віддається антеною на неузгоджене навантаження ($R_a \neq R_n, X_a \neq -X_n$), розраховується за формулою [82]

$$P = \chi P_{\max} = \frac{4R_a R_n}{(R_a + R_n)^2 + (X_a + X_n)^2} P_{\max}, \quad (2.20)$$

де χ – коефіцієнт узгодження антени з навантаженням.

Потужність, яку приймальна антена віддає в навантаження у разі, коли вхідний опір антени активний і дорівнює хвильовому опору фідера $Z_a = R_a = W_\phi$, а опір навантаження не дорівнює хвильовому опору фідера лінії передачі $Z_n \neq W_\phi$ (рис.4,б), знаходиться за допомогою виразу [88]

$$P = \frac{4K_{б.х}}{(1 + K_{б.х})^2} \eta_{\text{АФП}} P_{\max}, \quad (2.21)$$

де $K_{б.х}$ – коефіцієнт біжучої хвилі у фідері, неузгодженому з навантаженням; $\eta_{\text{АФП}}$ – ККД антенно-фідерного пристрою.

Ефективна площа (у квадратних метрах) приймальної антени [90]

$$S_{\text{еф}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \eta D = \frac{\lambda^2}{4\pi} G. \quad (2.22)$$

Власна шумова температура приймальної антени (у кельвінах) визначається за формулою [91]

$$T_{\text{а.с}} = T_0 (1 - \eta), \quad (2.23)$$

де T_0 - температура навколишнього середовища, К.

Максимальна потужність корисного сигналу P_c (Вт) на виході приймальної антени, що знаходиться в далекій зоні передавальної антени, розраховується за формулою ідеальної радіопередачі (6)

$$P_c = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi r)^2}, \quad (2.24)$$

де $P_{\text{пер}}$ – потужність сигналу, випромінюваного передавальною антеною, Вт; $G_{\text{пер}}$ – коефіцієнт підсилення передавальної і приймальної антен; λ - довжина хвилі, м; r - відстань між антенами, м.

Співвідношення потужності корисного сигналу P_c , прийнятого антеною, до потужності перешкод P_n , що надходять в антену рівномірно з усіх боків, дорівнює [28]

$$\frac{P_c}{P_n} = \left(\frac{E}{E_n} \right)^2 \frac{D}{4\pi}, \quad (2.25)$$

де E_n - напруженість поля зовнішніх перешкод, що діють на антену.

Коефіцієнт захисної дії прийомної антени, який визначається з її нормованої амплітудної ДС, розраховується:

- у відносних одиницях:

$$K_{\text{з.д}} = \frac{F\left(\frac{\pi}{2}\right)}{F\left(\frac{3\pi}{2}\right)} \quad (2.26)$$

- в децибелах

$$K_{з.д} = -20 \lg \left[\frac{F\left(\frac{\pi}{2}\right)}{F\left(\frac{3\pi}{2}\right)} \right]. \quad (2.27)$$

2.3 Параметри та характеристики друкованих вібраторних антен

Симетричним вібратором називається прямолінійний провід або металевий стрижень, розділений на дві рівні частини із живленням посередині (рис. 2.5). Довжина кожного плеча дорівнює l ; загальна довжина вібратора дорівнює $2l$. Точки АА - клеми антени. Відстань АА мала в порівнянні з розмірами плечей, тому нею знехтують. Симетричний вібратор звичайно є елементом складних антен і застосовується в радіолокації в діапазоні метрових, дециметрових і сантиметрових хвиль.

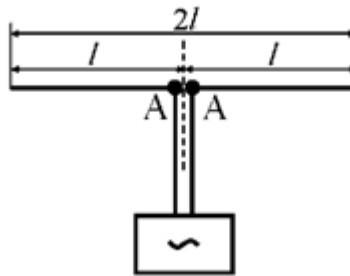
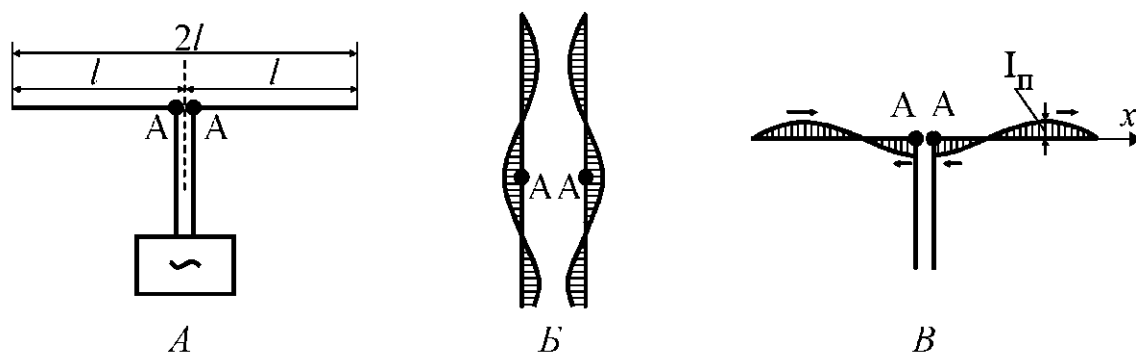


Рисунок 2.5 – Симетричний вібратор

У симетричному вібраторі $2l$ спів розмірно з довжиною хвилі λ , тому на відміну від елементарного вібратора розподіл струму по його довжині нерівномірний. Він розраховується за допомогою теорії довгих ліній по методу Шулейкіна, що запропонував звести плечі вібратора, одержавши довгу розімкнуту на кінці лінію, визначити розподіл струму в ній, а потім розвести плечі в попереднє положення (рис. 2.6). У результаті амплітуда струму уздовж вібратора розподілена за синусоїдальним законом і на його кінцях має вузли.

Рисунок 2.6 - симетричний вібратор $2l$

У симетричних точках вібратора струм однаковий по величині й напрямку. Закон розподілу струму виражається в такий спосіб [35]

$$I(x) = I_n \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (1 - |x|) \right], \quad (2.28)$$

де I_n - амплітуда струму в пучності; x - координата точки вібратора; $|x| \leq l$.

Відомий закон розподілу струму дозволяє за допомогою правила Бонч-Бруевича розрахувати діаграму спрямованості симетричного вібратора [60]

$$f(\theta) = 60 \left| \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta} \right|, \quad (2.29)$$

де $k = 2\pi / \lambda$ - хвильове число.

Діаграми спрямованості при різній довжині вібратора показані на рис. 2.7.

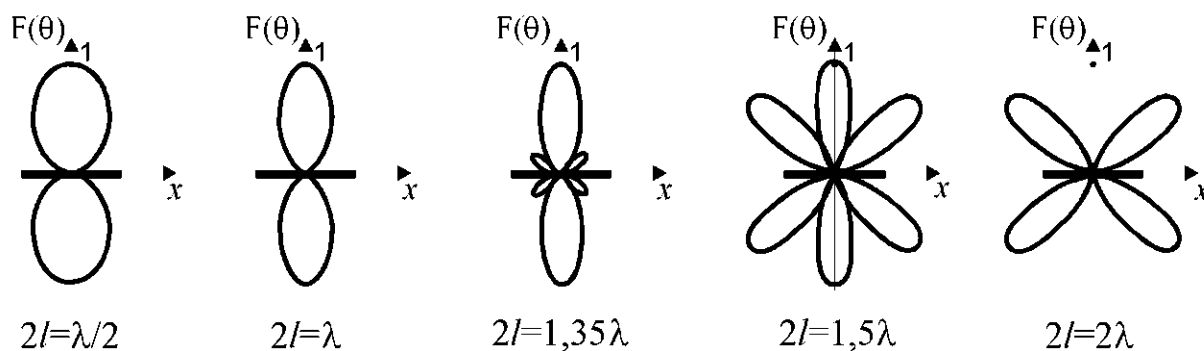


Рисунок 2.7 – Діаграми спрямованості вібратора

З наведених ДС видно, що при довжині вібратора $2l \leq \lambda$ бічні пелюстки відсутні, а максимум діаграми спрямованості збігається з нормаллю до осі антени. При $2l > \lambda$ з'являються бічні пелюстки, рівень яких зростає в міру збільшення довжини вібратора. У магнітній площині симетричний вібратор випромінює неспрямовано: $F(\theta) = 1$.

На практиці найбільше застосування знаходять півхвильові вібратори: $l = \lambda/2$. Для них $kl = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$, $\cos kl = 0$, і вираз (2.29) перетвориться до вигляду

$$f(\theta) = 60 \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right|, \quad F(\theta) = 60 \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \right|. \quad (2.30)$$

Параметри напівхвильового вібратора мають фіксовані значення й рівні

$$2\theta_{0,5p} = 78^\circ; \quad D_{\max} = 1,64.$$

Одним з важливих параметрів вібратора є його вхідний опір $Z_{\text{вх}} = \dot{U}_{\text{вх}} / \dot{I}_{\text{вх}}$, де $\dot{U}_{\text{вх}}$ и $\dot{I}_{\text{вх}}$ - комплексні амплітуди напруги й струми на клемі антени. Вхідний опір симетричного вібратора має комплексний характер

$$Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}} \quad (2.31)$$

Активна частина вхідного опору складається з опору випромінювання R_{Σ} й опору втрат R_{Π} у провіднику вібратора

$$R_{\text{вх}} = R_{\Sigma} + R_{\Pi}. \quad (2.32)$$

У діапазоні НВЧ $R_{\Sigma} \gg R_{\Pi}$ і можна вважати $R_{\text{вх}} \approx R_{\Sigma}$. Величина опору випромінювання залежить від відносної довжини вібратора. Ця залежність пред-

ставляється графіком Баллентайна-Кляцкіна (рис. 2.8). Для півхвильового вібратора $R_{\text{ex}} = R_{\Sigma} = 73,1 \text{ Ом}$.

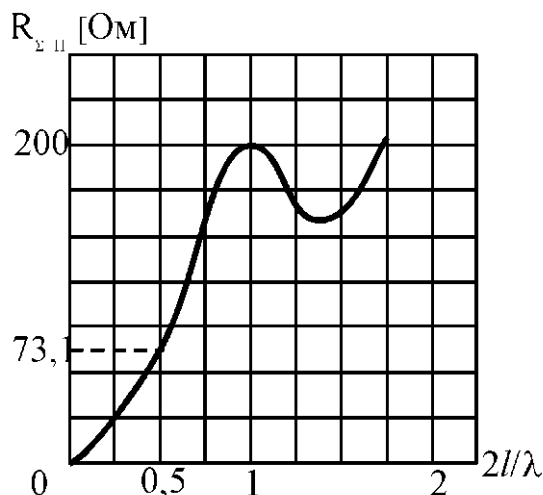


Рисунок 2.8 - графік Баллентайна-Кляцкіна, що показує залежність опору від довжини вібратора

Величина реактивного опору залежить від хвильових розмірів і товщини вібратора й визначається по формулах

$$X_{\text{ex}} = 42,5 - \rho_A \cdot \text{ctg} kl, \quad (2.33)$$

де $\rho_A = 120 \left(\ln \frac{\lambda}{\pi \cdot a} - 0,577 \right)$ - хвильовий опір антени, a - радіус проводу вібратора.

Для півхвильового вібратора $kl = \pi / 2$, $\text{ctg} kl = 0$ й $X_{\text{ex}} = 42,5 \text{ Ом}$.

Отже, вхідний опір півхвильового вібратора

$$\dot{Z}_{\text{ex}} = 73,1 + j42,5 [\text{Ом}] \quad (2.34)$$

Оскільки уявна частина виразу (3.7) має знак "+", те реактивність носить індуктивний характер. Щоб погодити антену з фідером, необхідно реактивну

частину вхідного опору зробити рівної нулю. Відповідно до виразу (2.33) $X_{ex}=0$, якщо $\rho_A \cdot ctg kl = 42,5$. Підбираючи величину l , можна компенсувати реактивність X_{ex} , тобто настроїти вібратор у резонанс. Для цього його по обидва боки треба вкоротити на величину

$$\Delta = \frac{42,5}{\rho_A} \cdot \frac{\lambda}{2\pi}. \quad (2.35)$$

Якщо вібратор укоротити ще більше, ті його опір стане ємнісним.

Одиночні вібраторні антени є слабоспрямованими. Для збільшення КСД і одержання діаграми спрямованості необхідної форми застосовують багатовібраторні антени. Взаємне розміщення вібраторів може бути різним (рис. 2.9), але, як правило, вони ідентичні, однаково орієнтовані й тому утворюють систему, до якої можна застосувати правило перемноження діаграм спрямованості

$$f(\theta, \varphi) = f_0(\theta, \varphi) \cdot f_{сист}(\theta, \varphi) \quad (2.36)$$

де $f_0(\theta, \varphi)$ - діаграма спрямованості одиночного вібратора; $f(\theta, \varphi)$ - ДС багатовібраторної антени.

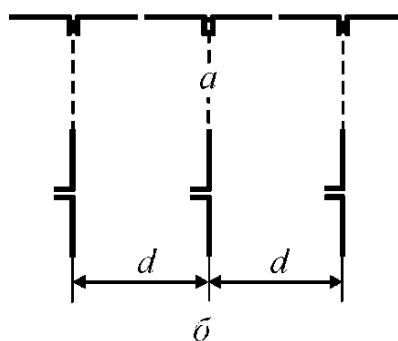


Рисунок 2.9 – Взаємне розміщення друкованих вібраторів

Множник системи не залежить від кута орієнтації плечей вібраторів щодо осі системи z , а визначається тільки кількістю випромінювачів N , відстанню

між їхніми центрами d , відносною амплітудою A і фазою Φ струму в кожному вібраторі. Залежно від співвідношення параметрів системи її діаграма спрямованості $f(\theta, \varphi)$ може бути однопелюстковою, багатопелюстковою з орієнтацією головного максимуму уздовж осі системи, перпендикулярно до неї або під будь-яким кутом у межах $\pm 90^\circ$ щодо нормалі. Для того щоб головний пелюсток результуючої ДН антени був досить вузьким, необхідно сполучити напрямки головних пелюстків діаграм спрямованості одиночного вібратора й системи (рис. 2.10). У першому випадку (див. рис. 2.10, а) головний пелюсток множника системи повинен бути перпендикулярний її осі. Це досягається синфазним живленням вібраторів. У другому випадку (див. рис. 2.10, б) головний пелюсток МС повинен бути спрямований уздовж її осі. Це досягається відповідним підбором хвильової відстані між вібраторами d/λ й амплітудно-фазовим розподілом. При рівних струмах у вібраторах ($A=1$) головний максимум множника системи спрямований уздовж її осі за умови [71]

$$\Phi = 2\pi d / \lambda \quad (2.37)$$

де Φ - фазовий зсув струмів у сусідніх вібраторах. Так, при $d/\lambda=0,2$ різниця фаз струмів повинна становити 72° , а при $d/\lambda=0,25$ - 90° .

На рис. 2.10 множник системи й діаграма спрямованості антени в цілому виявляються постійними величинами в площині, перпендикулярній вібраторам (Н-площині), тобто антена в цій площині випромінює в усі сторони. Щоб забезпечити спрямованість антени також у цій площині, необхідно виконати дві умови [71]:

- 1) $\Phi = 2\pi d / \lambda$
- 2) $N = \pi / \Phi$, де N - кількість вібраторів у системі.

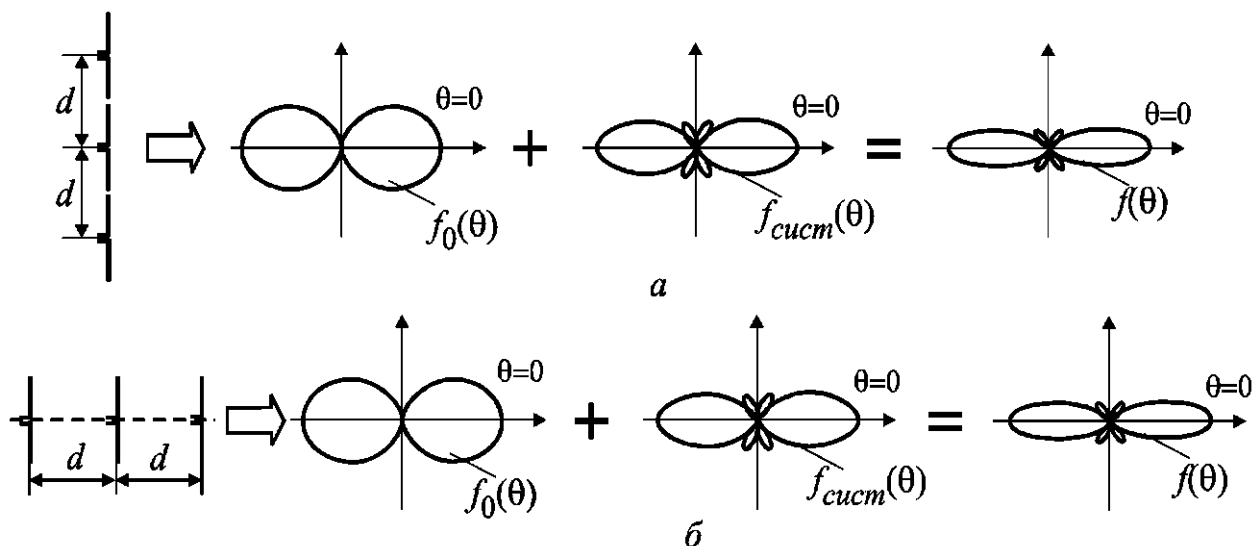


Рисунок 2.10 – Діаграми спрямованості антени

Так, якщо $d/\lambda=0,25$, тоді $\Phi=90^\circ$ й $N=2$. Система із двох вібраторів, що відповідають цим умовам, показана на рис. 2.11. Розглянемо взаємодію полів у такій системі.

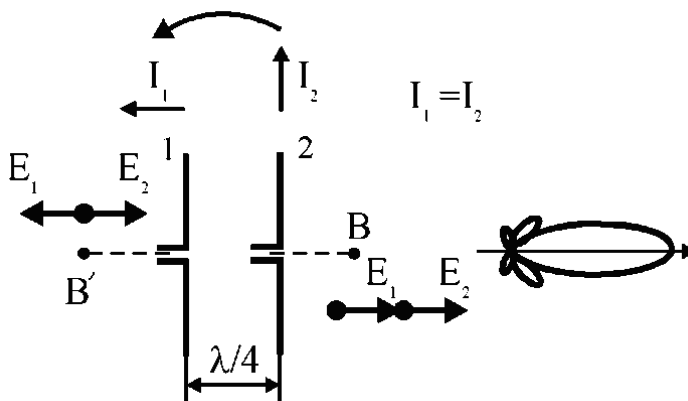


Рисунок 2.11 – Система з двох друкованих вібраторів

Якщо струм I_1 у вібраторі 1 випереджає по фазі струм I_2 , тоді електромагнітне поле ліворуч від системи вібраторів (точка В') дорівнює нулю, оскільки поле вібратора 2, проходячи відстань $\lambda/4$ убік першого вібратора, одержує додаткове запізнення по фазі на 90° і виявляється в протифазі з полем вібратора 1. Таким чином, випромінювання відбувається в одну сторону уздовж осі

системи в напрямку вібратора з відстаючим по фазі струмом. Випромінювання двовібраторної антени набуває спрямованість в одну півсферу, у тому числі в площині Н.

Для одержання випромінювання з такою спрямованістю не обов'язково заживлювати обидва вібратори. Дуже часто використовують систему (рис. 2.12), у якій живлення подається на один з вібраторів називаний *активним*, а другий до генератора не підключається (він називається *пасивним*).

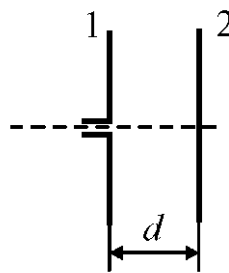


Рисунок 2.12 – Система з двох вібраторів

Принцип дії розглянутої антени полягає в наступному. Струм I_1 активного вібратора збуджує в навколишньому просторі електромагнітне поле, що індукує струм I_2 у пасивному. Поле в будь-якій точці навколишнього простору є суперпозицією полів, збуджуваних струмами в обох вібраторах. Струми мають приблизно однакові розподіли, але можуть відрізнитися як по величині, так і по фазі. Величина струму I_2 залежить від відстані d/λ , й при малих його величинах ($d/\lambda=0,1 \dots 0,2$) $I_2 \approx I_1$. Фазовий зсув струмів Φ залежить як від відносної відстані d/λ , так і від довжини пасивного вібратора $l_{\text{п}}$. Відомо, що півхвильовий вібратор має індуктивний опір. Для настроювання в резонанс активний вібратор укорочують на деяку величину Δ . Якщо пасивний вібратор залишити півхвильовим або навіть злегка подовжити його ($l_{\text{п}} > l_{\text{а}}$), тоді його індуктивний характер викличе випередження по фазі струму I_2 відносно струму в активному вібраторі I_1 . Це значить, що випромінювання буде відбуватися убік активного ві-

братора (рис. 2.13, а). Пасивний вібратор як би відштовхує від себе випромінювання, тому він називається *рефлектором* (відбивачем).

Якщо ж пасивний вібратор укоротити в порівнянні з активним (див. рис. 2.13 б), той його опір стає ємнісним, струм I_2 відстає по фазі від струму I_1 й випромінювання відбувається убік пасивного вібратора. У цьому випадку він називається *директором*.

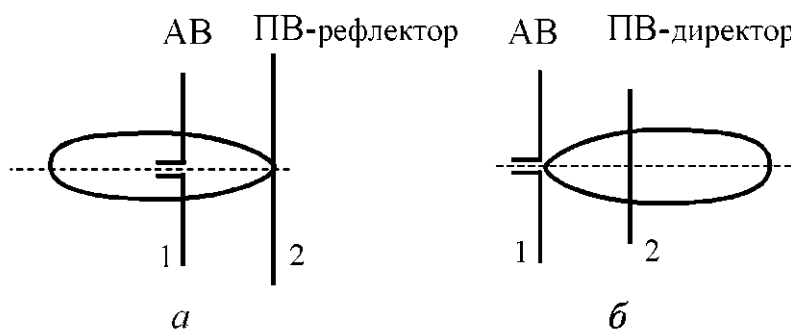


Рисунок 2.13 – ПВ-рефлектор та ПВ-директор

Як показано вище, вхідний опір симетричного вібратора має комплексний характер [72]

$$Z_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} + jX_{\text{вх}} + j(42,5 - \rho_A \cdot \text{ctg} kl), \quad (2.38)$$

де $R_{\text{вх}} = R_{\Sigma} + R_{\Pi}$ - активна складова вхідного опору, що складається з опору випромінювання R_{Σ} й опору втрат R_{Π} у провіднику вібратора;

$\rho_A = 120 \left(\ln \frac{\lambda}{\pi \cdot a} - 0,577 \right)$ - хвильовий опір антени, a - радіус проводу вібратора;

$2l$ - довжина вібратора.

Оскільки уявна частина виразу (2.38) має знак "+", тому реактивність носить індуктивний характер. Щоб погодити антену з фідером, необхідно вкоротити вібратор по обидва боки на величину $\Delta = \frac{42,5}{\rho_A} \cdot \frac{\lambda}{2\pi}$.

Якщо поруч із одним вібратором розмістити інший, тоді утвориться система із двох вібраторів, електрично зв'язаних один з одним через випромінюване ними електромагнітне поле. Кожен з вібраторів діє на інший і як би вносить у нього додатковий опір, що називається внесеним і має комплексний характер

$$Z_{\text{внос}} = R_{\text{внос}} + jX_{\text{внос}} \quad (2.39)$$

Якщо струми в ідентичних вібраторах однакові ($I_1 = I_2$), тоді внесені опори рівні й називаються взаємними [72]

$$Z_{\text{внос1}} = Z_{\text{внос2}} = Z_{12} = Z_{21} \quad (2.40)$$

де $Z_{\text{внос1}}$ - опір, внесений в перший вібратор; $Z_{\text{внос2}}$ - опір, внесений в другий вібратор; Z_{12} і Z_{21} - взаємні опори (для однакових вібраторів, по визначенню, вони рівні $Z_{12}=Z_{21}$).

Якщо струми у вібраторах різні ($I_1 \neq I_2$), тоді вібратор з більшим струмом вносить в інший більший опір. Тому

$$Z_{\text{внос1}} = \frac{I_1}{I_2} Z_{12} \quad \text{і} \quad Z_{\text{внос2}} = \frac{I_1}{I_2} Z_{21} = \frac{I_1}{I_2} Z_{12}. \quad (2.41)$$

Позначимо вхідний опір одиночного вібратора Z_{11} (другого Z_{22}), а той, що знаходиться в системі - Z_1 (відповідно Z_2). У загальному випадку повний вхідний опір вібраторів, що працюють у системі, визначається виразами [34]

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= Z_{11} + Z_{\text{внос1}} = Z_{11} + \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} Z_{12} \\ Z_2 &= Z_{22} + Z_{\text{внос2}} = Z_{22} + \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} Z_{12} \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

Взаємні опори однаково орієнтованих $\lambda/2$ -вібраторів залежать тільки від їх взаємного відносного віддалення по глибині (d) або фронту (h). Вони розраховані й наведені в навчальній і довідковій літературі або у вигляді таблиць, або у вигляді графіків.

З виразу (2.42) випливає, що для визначення повного вхідного опору вібратора в системі треба знати відношення комплексних амплітуд струмів у вібраторах, тобто їхній амплітудно-фазовий розподіл [73]

$$\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} \cdot e^{j(\phi_2 - \phi_1)} = A \cdot e^{j(\phi)} \quad \text{де} \quad A = \frac{I_2}{I_1}; \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 \quad (2.43)$$

З врахуванням АФР співвідношення (2.42) можна записати як

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= Z_{11} + A \cdot e^{j(\phi)} \cdot Z_{12} \\ Z_2 &= Z_{22} + \frac{1}{A \cdot e^{j(\phi)}} \cdot Z_{12} \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

Таким чином, якщо задані відносні розміри вібраторів $2l/\lambda$, відносні відстані між ними d/λ (h/λ), довжина хвилі λ , амплітудно-фазовий розподіл струмів між ними, тоді відносно легко визначаються їх повні вхідні опори в системі вібраторів.

Ті ж міркування застосовні й до системи із двох вібраторів, у якій один вібратор активний, а інший пасивний. Якщо активний вібратор позначити індек-

сом "1", а пасивний - індексом "2", то вхідний опір активного вібратора в присутності пасивного визначається виразом

$$Z_1 = Z_{11} + \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} Z_{12} = Z_{11} + A \cdot e^{j(\phi)} \cdot Z_{12} \quad (2.45)$$

Струм \dot{I}_2 у пасивному вібраторі утвориться за рахунок наведеної в ньому ЕРС полем активного. Якщо струм в активному вібраторі \dot{I}_1 вважається відомим, то струм пасивного вібратора визначається виразом: $\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 \frac{Z_{12}}{Z_{11}}$, а АФР до-

рівнює $A \cdot e^{j\phi} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = -\frac{Z_{21}}{Z_{22}}$.

Тоді повний опір активного вібратора [39]

$$Z_1 = Z_{11} - \frac{Z_{21}}{Z_{22}} Z_{12} = Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22}} \quad (2.46)$$

Якщо антенна система складається не із двох, а з N вібраторів, тоді повний вхідний опір кожного з них може бути отримано підсумовуванням власного й всіх внесених опорів на основі заданого амплітудно-фазового розподілу

$$Z_1 = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\dot{I}_n}{\dot{I}_k} Z_{kn} \quad (2.47)$$

де n - порядковий номер вібратора, $n=0,1,\dots,N-1$; k - номер вібратора, у якого визначається вхідний опір.

Очевидно, що при настроюванні вібратора в резонанс на заданій довжині хвилі його вкорочення повинне розраховуватися з урахуванням внесеного опору [40]

$$X_{\text{вх}} = 42,5 - \rho_A \cdot \text{ctg} kl + X_{\text{внос}} \quad (2.48)$$

У цьому випадку необхідно знайти таке $l = \frac{\lambda}{4} - \Delta$, щоб $X_{gx} = 0$.

Таким чином, застосування системи з активного й пасивного вібраторів дозволяє поліпшити характеристики спрямованості вібраторної антени. Однак напівхвильовий вібратор з рефлектором або директором усе ще слабо спрямований. Максимальний коефіцієнт спрямованої дії такої системи становить $D_{\max} = 4 \dots 6$.

2.4 Спрямовані властивості друкованих багатовібраторних антен

Для поліпшення спрямованих властивостей до симетричного вібратора часто додають другий вібратор, розташований на деякій відстані від першого. Другий вібратор, як і перший, може бути або активним і приєднуватися до генератора, або пасивним і збуджуватися електромагнітним полем першого вібратора.

Нехай два однакових вібратори лежать в одній площині, паралельні один одному, є активними, а їхні струми живлення зв'язані між собою співвідношенням

$$\frac{I_2}{I_1} = m \exp(i\Delta\Phi) \quad (2.49)$$

де m - відношення амплітуд струмів; $\Delta\Phi = (\Phi_2 - \Phi_1)$ - зсув фази струму I_2 щодо фази струму I_1 (у радіанах). Осі вібраторів паралельні осі z .

Поряд із прямокутною, уведемо сферичну систему координат. Тоді нормовані амплітудні ДН двохвібраторної системи можуть бути записані у вигляді

- у площині E

$$\bar{F}(\varphi) = \frac{\cos(kl \cos\theta) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \sin\theta} \cdot \sqrt{\frac{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd \sin\theta)}{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd)}} \quad (2.50)$$

• у площині H

$$\bar{F}(\varphi) = \sqrt{\frac{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd \sin\varphi)}{1 + m^2 + 2m \cos(\Delta\Phi - kd)}} \quad (2.51)$$

де $k = 2\pi/\lambda$ - хвильове число, λ - довжина хвилі; l - довжина плеча вібраторів; d - відстань між ними; кут θ відлічується від осі z ; φ - полярний кут.

Опір випромінювання системи, віднесене до струму в точках живлення першого вібратора, розраховується по формулі [28]

$$R_{\Sigma c} = R_{\Sigma 1} + m^2 R_{\Sigma 2} + 2m R_{12} + \cos\Delta\Phi, \quad (2.52)$$

де $R_{\Sigma 1}$ і $R_{\Sigma 2}$ - власні активні опори випромінювання вібраторів, віднесені до максимумів струмів; R_{12} - активна складовая взаємного опору вібраторів, віднесена до максимуму струму й залежна від відстані d між вібраторами.

Криві активної R_{12} і реактивної X_{12} складові взаємного опору півхвильових вібраторів залежно від відносної відстані d/λ між ними зображені на рис. 2.14.

Результуючий КНД системи вібраторів знаходиться як [28]

$$D_c = \frac{D_0 (1 + m)^2 R_{\Sigma 1}}{R_{\Sigma c}}, \quad (2.53)$$

де D_0 - КНД одиночного вібратора, обумовлений формулою [28]

$$D_0 = \frac{w}{\pi R_{\Sigma II}} (1 - \cos kl)^2. \quad (2.54)$$

Для напівхвильового вібратора $D_0 \cong 1,64$.

Якщо другий вібратор є пасивним, то відношення амплітуд m і різниця фаз струмів на входах вібраторів визначають із рівняння Кирхгофа, складеного для пасивного вібратора,

$$U_{bx2} = I_2 Z_{22} + I_1 Z_{12} = 0, \quad (2.55)$$

у якому I_1, I_2 - комплексні значення струмів пасивного й активного вібраторів; Z_{22} - власний комплексний опір пасивного вібратора; Z_{12} - взаємний комплексний опір, внесений активним вібратором у пасивний.

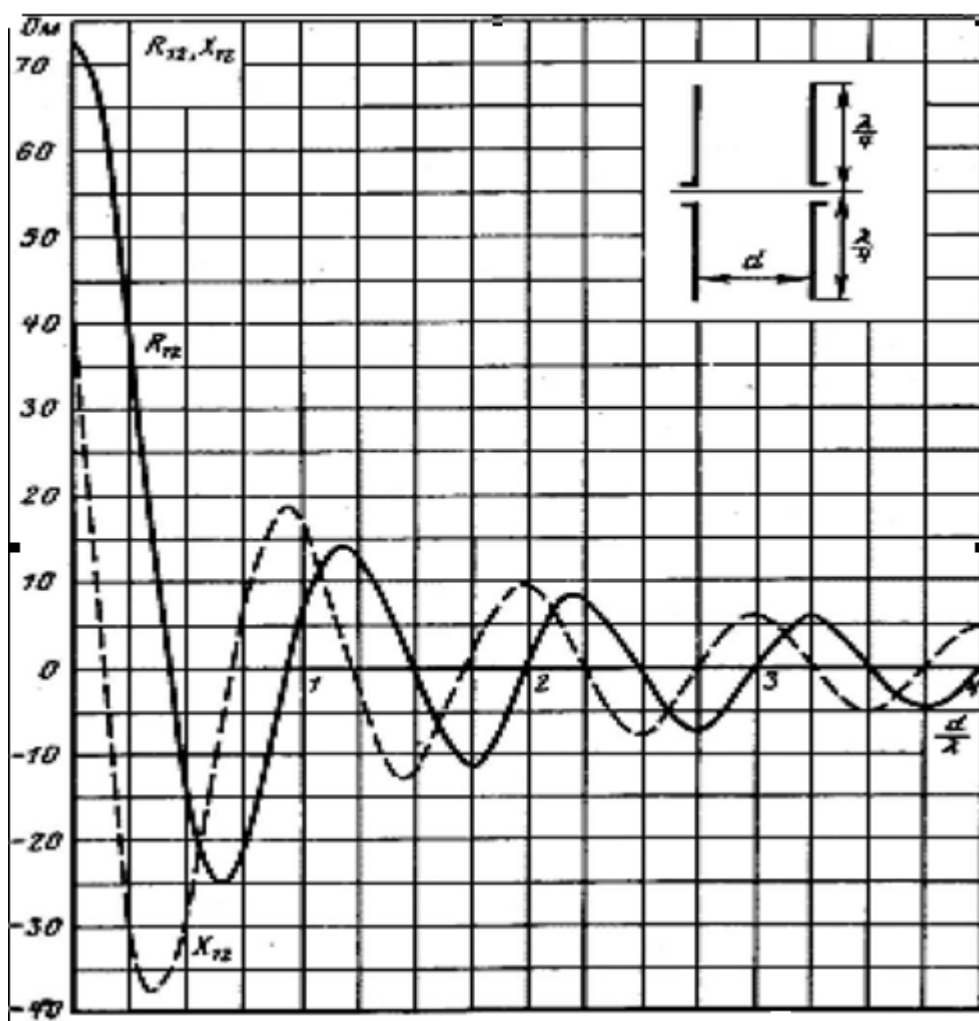


Рисунок 2.14 - Взаємний імпеданс напівхвильових вібраторів

З рівняння (2.55) маємо

$$\frac{I_2}{I_1} = -\frac{Z_{12}}{Z_{22}} = -\frac{R_{12} + iX_{12}}{R_{22} + i(X_{22} + X_{H2})}, \quad (2.56)$$

де R_{12} і X_{12} - активної й реактивної складової взаємного опору вібраторів; R_{22} і X_{22} - активна й реактивна складової власного опору пасивного вібратора; X_{H2} - реактивний опір настроювання, що включається в пасивний вібратор і віднесене до максимуму струму в ньому.

У R_{22} входять активні втрати в пасивному вібраторі. Якщо їх не враховувати, то необхідно думати $R_{22} = R_{\Sigma 2}$.

З (2.56) одержуємо

$$m = \frac{|I_2|}{|I_1|} = \sqrt{\frac{R_{12}^2 + X_{12}^2}{R_{22}^2 + (X_{22} + X_{H2})^2}}, \quad (2.57)$$

$$\Delta\Phi = \pi + \operatorname{arctg} \frac{X_{12}}{R_{12}} - \operatorname{arctg} \frac{X_{22} + X_{H2}}{R_{22}}. \quad (2.58)$$

Нормовані амплітудні ДН і КНД такої системи також розраховуються по формулах (2.49), (2.50) і (2.52), але опір випромінювання знаходиться як

$$R_{\Sigma C} = R_{\Sigma 1} + m(R_{12} \cos \Delta\Phi - X_{12} \sin \Delta\Phi), \quad (2.59)$$

де $R_{\Sigma 1}$ - власний опір випромінювання активного вібратора, віднесене до максимуму струму.

Вхідний опір активного вібратора в системі може бути записане у вигляді

$$Z_{bx} = R_{bx} + iX_{bx} = Z_{11} + mZ_{12}e^{i\Delta\Phi}. \quad (2.60)$$

Після перетворення (2.60) одержимо

$$R_{bx} = R_{11} + m(R_{12} \cos \Delta\Phi - X_{12} \sin \Delta\Phi), \quad (2.61)$$

$$X_{bx} = X_{11} + m(X_{12} \cos \Delta\Phi + R_{12} \sin \Delta\Phi). \quad (2.62)$$

Нормована амплітудна ДН або множник спрямованості лінійної еквідистантної ($d = const$) решітка N ізотропних випромінювачів при постійних амплітудних і лінійному фазовому розподілах збудження типу $I(z) = I_0 \exp[-i(N-1)z]$ має вигляд [68]

$$\bar{f}_z(\theta) = \frac{\sin[0,5N(kd \cos \theta - \Delta\Phi)]}{N \sin[0,5(kd \cos \theta - \Delta\Phi)]}, \quad (2.63)$$

де $\Delta\Phi$ - різниця фаз між струмами сусідніх випромінювачів, θ - кут у радіанах між віссю решітки і напрямком у точку спостереження.

Напрямку головних максимумів ДН і бічних пелюстків (у радіанах) визначаються по формулах [68]

$$\theta_{2l} = \arccos \frac{2q\pi + \Delta\Phi}{kd}, q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.64)$$

$$\theta_q = \arccos \frac{2(q+1)\pi + N\Delta\Phi}{Nkd}, q = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.65)$$

Рівень бічних пелюстків стосовно головного знаходиться як [68]

$$F_q(\theta) \approx \frac{1}{N \sin\left(\frac{q\pi}{N} + 0,5\pi N\right)}, \quad (2.66)$$

де q - номер бічного пелюстка.

Практичний інтерес представляють рівноамплітудні лінійні еквідистантні решітки з поперечним або поздовжнім розташуванням симетричних вібраторів. Щоб сформувану односпрямовану ДН і вдвічі збільшити КНД, до решітки поздовжніх вібраторів додають таку ж кількість вібраторів, що грають роль рефлек-

кторів, які встановлюють на відстані $\lambda/4$ від вібраторів. Множник спрямованості системи випромінювач - рефлектор при настроєному рефлекторі в цьому випадку має вигляд [49]

$$\bar{f}_{\Sigma}(\theta) = \cos[0,25\pi(1 - \sin\theta)] \quad (2.67)$$

а якщо рефлектор виконаний плоским у вигляді дротяної сітки або суцільного металевого аркуша, тоді [49]

$$\bar{f}_{\Sigma}(\theta) = \sin(0,5\pi\sin\theta). \quad (2.68)$$

Опір випромінювання багатовібраторної антенної решітки розраховується як [49]

$$R_{\Sigma C} = R_{\Sigma 1} + R_{\Sigma 2} + \dots + R_{\Sigma i} + \dots + R_{\Sigma N}, \quad (2.69)$$

де

$$R_{\Sigma i} = R_{\Sigma i1} + R_{\Sigma i2} + \dots + R_{\Sigma ii} + \dots + R_{\Sigma iN}. \quad (2.70)$$

В (2.70) $R_{\Sigma i1}, \dots, R_{\Sigma iN}$ - внесені опори випромінювання, обумовлені впливом кожного з інших вібраторів решітки на i -й; $R_{\Sigma ii}$ - опір випромінювання відокремленого i -го вібратора решітки, віднесене до максимуму струму. Значення внесеного опору залежить від відстані між вібраторами d , їхнього осьового зсуву h і наведені в табл.2.1.

Користуючись значеннями внесених опорів випромінювання, можна знаходити опори випромінювання не тільки синфазних вібраторів, але й протифазних. В останньому випадку знаки в значень опорів, зазначених у табл. 2.1, потрібно змінити на протилежні.

Таблиця 2.1 – Значення внесеного опору при різних співвідношеннях геометричних параметрів багатовібраторної антени

d/λ	$R_{\Sigma_{вн}}, Ом$			
	$h/\lambda=0$	$h/\lambda=0,5$	$h/\lambda=1$	$h/\lambda=1,5$
0	+73,1	+26,4	-4,1	+1,7
0,1	+67,3	+23,5	-4,1	+1,7
0,2	+51,4	+15,7	-4,0	+1,7
0,3	+29,3	+5,2	-3,5	+1,6
0,4	+6,2	-4,9	-2,4	+1,4
0,5	-12,5	-11,9	-0,8	+1,1
0,6	-23,3	-14,1	+1,5	+0,5
0,7	-24,9	-11,3	+3,6	-0,4
0,8	-18,5	-4,9	+5,1	-1,3
0,9	-7,5	+2,8	+5,3	-2,1
1,0	+4,0	+9,0	+4,1	-2,7
1,1	+12,4	+12,0	+1,5	-2,8
1,2	+15,2	+10,8	-1,6	-2,2
1,3	+12,6	+6,3	-4,5	-1,1
1,4	+6,0	-0,1	-6,3	+0,4
1,5	-1,8	-5,8	-6,2	+2,1
1,6	-8,1	-9,2	-4,3	+3,4
1,7	-10,9	-9,3	-1,2	+4,0
1,8	-9,4	-6,1	+2,4	+3,6
1,9	-4,8	-1,2	+5,1	+2,2
2,0	+1,1	+3,9	+6,3	-0,1
2,1	+6,1	+7,2	+5,4	-1,9
2,2	+8,4	+7,8	+2,9	-3,6
2,3	+7,6	+5,6	-0,5	-4,3
2,4	+4,0	+1,6	-3,6	-3,8
2,5	-0,7	-2,2	-5,4	-2,2

3 КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ШИРОКОСМУГОВОЇ ДРУКОВАНОЇ GSM АНТЕНИ

3.1 Розрахунок електричних параметрів широкосмугової друкованої антени

Швидке зростання радіотехнологій доступу інтернету речей зумовило стрімкий розвиток антенної техніки. Основний напрямок досліджень – це мініатюризація антен для носимих пристроїв [1, 2]. Головною задачею є зменшення геометричних розмірів антени на задану довжину електромагнітної хвилі. Одним із варіантів розв'язку цієї задачі є використання гнучких антен [3, 4]. Гнучкі антени мають широке застосування у пристроях Інтернету речей, інфокомунікаційних мереж 4G і 5G, бездротових сенсорних мереж і телемедицини [3, 4]. Метою розрахунку є розроблення дизайну гнучкої антени з характеристичним опором 50 Ом для частотного діапазону В20 800 МГц і В3 1900 МГц із заданими електричними параметрами.

Дизайн патч-антени зображений на рис. 3.1,а, та наведено в додатку Б. Для задовільного функціонування патч-антени потрібно щоб її геометричні розміри задовольняли такі співвідношення [4]

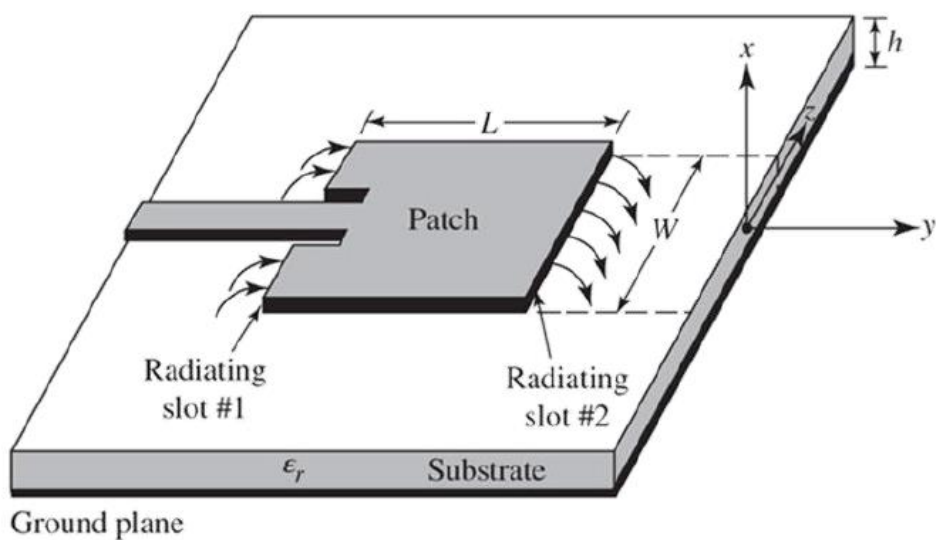
$$\begin{cases} \frac{\lambda_0}{3} < L < \frac{\lambda_0}{2}, \\ 0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0, \\ 2.2 \leq \varepsilon_r \leq 12, \end{cases} \quad (3.1)$$

де λ_0 це довжина хвилі середньої частоти робочого діапазону частот. Ширина патч-антени W обирається з міркувань забезпечення потрібного імпедансу на резонансній частоті [4]

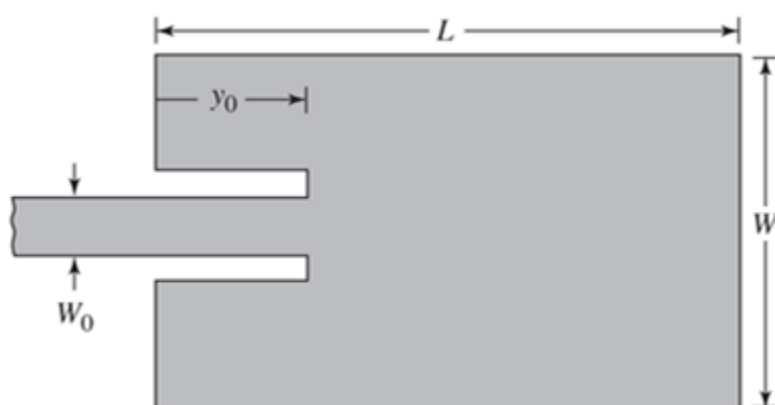
$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{c_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (3.2)$$

де c_0 це швидкість світла у вакуумі.

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{W}}}. \quad (3.3)$$



а)



б)

Рисунок 3.1 - Конструкція мікросмушкової патч-антени (а) та геометричні розміри її форми для розрахунку (б)

Ефективна довжина патч-антени [4]

$$L_{eff} = L + \Delta L, \quad (3.4)$$

де

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)}. \quad (3.5)$$

Резонансна частота для основного режиму TM_{010}

$$f_{r_{010}} = \frac{1}{2L\sqrt{\varepsilon_r}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = \frac{c_0}{2L\sqrt{\varepsilon_r}}. \quad (3.6)$$

З урахуванням ефективної довжини патч-антени її резонансна частота визначена як [4]

$$f_{rc_{010}} = \frac{1}{2L_{eff}\sqrt{\varepsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = q \frac{c_0}{2L\sqrt{\varepsilon_r}}, \quad (3.7)$$

Де

$$q = \frac{f_{rc_{010}}}{f_{r_{010}}}. \quad (3.8)$$

Провідність і вхідний опір прямокутної патч-антени дорівнює [4]

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= G_1 + jB_1, \\
 G_1 &= \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24} (k_0 h)^2 \right], \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10}, \\
 B_1 &= \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - 0.636 \ln(k_0 h) \right], \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10},
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

де

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}.$$

Вхідний опір патч-антени розраховується за формулою [4]

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 + G_{12})}, \tag{3.10}$$

де

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos(\theta)\right)}{\cos(\theta)} \right]^2 J_0(k_0 L \sin(\theta)) \sin^3(\theta) d\theta,$$

де J_0 це функція Бесселя першого роду нульового порядку.

Зменшення вхідного опору відносно точки живлення досягається шляхом врізки довжиною y_0 в прямокутник патч-антени (рис. 3.1,б). У такому випадку вхідний опір [4]

$$R_{m(y=y_0)} = R_{m(y=0)} = \cos\left(\frac{\pi}{L} y_0\right). \tag{3.11}$$

Хвильовий опір мікросмушкової лінії живлення товщиною W_0 (рис. 3.1,б)

$$Z_c = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} \ln \left[\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right], & \frac{W_0}{4} \leq 1, \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}} \left[\frac{W_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1.444 \right) \right]}, & \frac{W_0}{h} > 1. \end{cases} \quad (3.12)$$

Рівняння діаграми спрямованості патч-антени мають такий вигляд [4]:

- у просторі

$$f(\theta, \varphi) = \frac{\sin \left[\frac{kW}{2} \sin(\theta) \sin(\varphi) \right]}{\frac{kW}{2} \sin(\theta) \sin(\varphi)} \cos \left(\frac{kL}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi) \right), \quad (3.13)$$

- у площині E ($\varphi = 0^\circ$)

$$F_E(\theta) = \cos \left(\frac{kL}{2} \sin(\theta) \right), \quad (3.14)$$

- у площині H ($\varphi = 90^\circ$)

$$F_H(\theta) = \cos(\theta) \frac{\sin \left(\frac{kW}{2} \sin(\theta) \right)}{\frac{kW}{2} \sin(\theta)}. \quad (3.15)$$

Коефіцієнт спрямованої дії для випадку ($k_0 h \ll 1$) розраховується за формулою [4]

$$D_0 = \frac{U_{\text{max}}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}}, \quad (3.16)$$

де

$$U_{\text{max}} = \frac{|V_0|^2}{2\eta_0 \pi^2} \left(\frac{\pi W}{\lambda_0} \right)^2, \quad (3.17)$$

$$P_{\text{rad}} = \frac{|V_0|^2}{2\eta_0 \pi^2} \int_0^\pi \left[\frac{\sin \left(\frac{k_0 W}{2} \cos(\theta) \right)}{\cos(\theta)} \right]^2 \sin^3(\theta) d\theta. \quad (3.18)$$

Сумарна добротність патч-антени визначається сумарними втратами [4]

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}}, \quad (3.19)$$

де Q_t сумарна добротність, Q_{rad} добротність із урахуванням втрат на випромінювання, Q_c добротність з урахуванням втрат на провідність (омічні втрати), Q_d добротність з урахуванням втрат у діелектрику, Q_{sw} добротність з урахуванням втрат на поверхневі електромагнітні хвилі (з урахуванням поверхневих струмів провідності та скін-ефекту), які за умови ($k_0 \ll h$) розраховуються відповідно по формулах [4]

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu \sigma},$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan(\delta)},$$

$$Q_{rad} = \frac{2\omega \varepsilon_r}{hG_t/l} K,$$

де для режиму електромагнітної хвилі TM_{010}

$$K = \frac{L}{4},$$

$$G_t = G_{rad} \frac{l}{W}.$$

Величина сумарної добротності патч-антени значно впливає на її ширину смуги пропускання. Відносна ширина смуги пропускання патч-антени [4]

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0},$$

розраховується по формулі

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q_t}, \quad (3.20)$$

де f_{\max} і f_{\min} це відповідно максимальна частота та мінімальна частота робочого діапазону, f_0 це середня частота робочого діапазону [4]

$$f_0 = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2}.$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{VSWR - 1}{Q_t \sqrt{VSWR}}. \quad (3.21)$$

Приблизний вираз пропускної здатності для $VSWR \leq 2$ та $|\Gamma| \leq 1/3$

$$\Delta f = 3.771 \left[\frac{\epsilon_r - 1}{(\epsilon_r)^2} \right] \frac{h}{\lambda_0} \left(\frac{W}{L} \right). \quad (3.22)$$

По наведених формулах (3.1) – (3.22) були проведені електричні розрахунки. Креслення друкованої патч-антени з розрахованими геометричними розмірами наведене на рис. 3.2.

Ескіз широкопугової друкованої антени наведений в Додатку В (08-36.МКР.004.00.000 ПЛ).

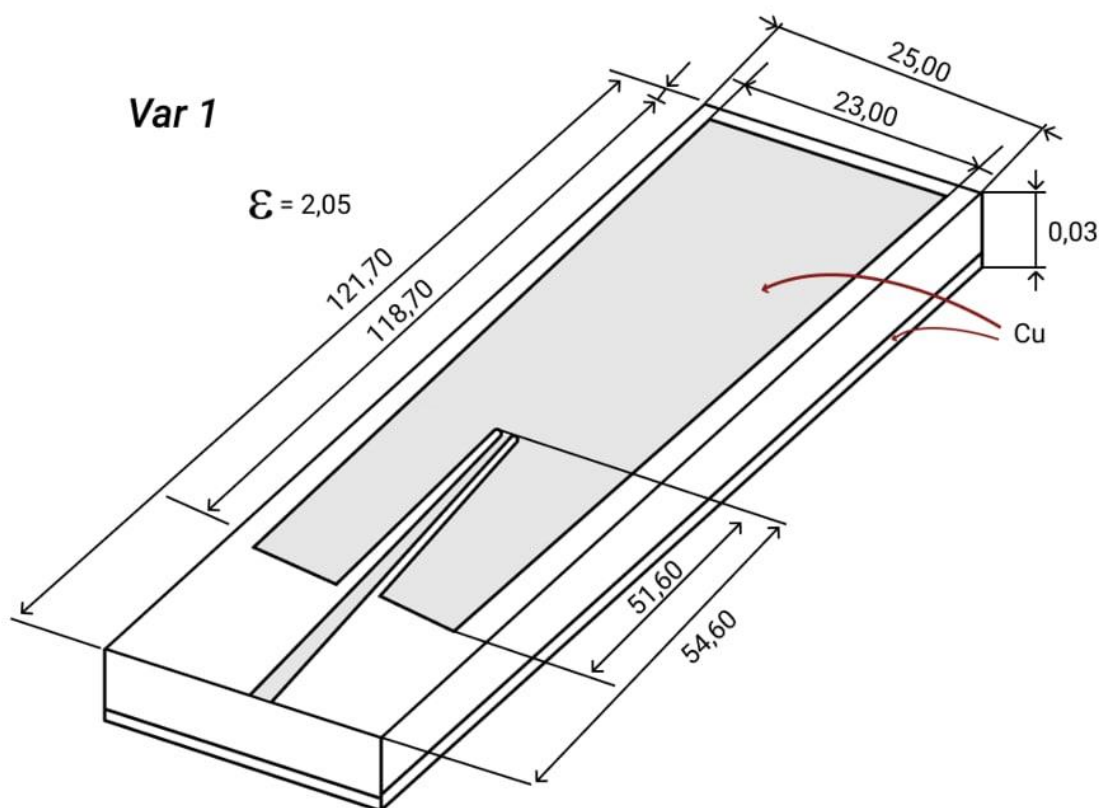


Рисунок 3.2 – Конструкція друкованої патч-антени з розрахованими геометричними параметрами

3.2 Комп'ютерне проектування широкосмугової друкованої антени в пакеті програм ANSYS HFSS

Електродинамічний моделювання в HFSS засноване на використанні методу кінцевих елементів (Finite Element Method, FEM). Розв'язання граничного завдання шукається у частотній області. Використання методу кінцевих елементів забезпечує високий рівень універсальності чисельних алгоритмів, які виявляються дуже ефективними широкого кола завдань від аналізу хвильоводних і смужкових структур до моделювання антен і складних невзаємних пристроїв, що містять гіротропні середовища.

Створення проекту широкосмугової друкованої патч-антени в пакеті програм ANSYS HFSS наведено на рис. 3.3. Підключення «точки живлення» до антени наведено на рис. 3.4 та наведено в додатку Д.

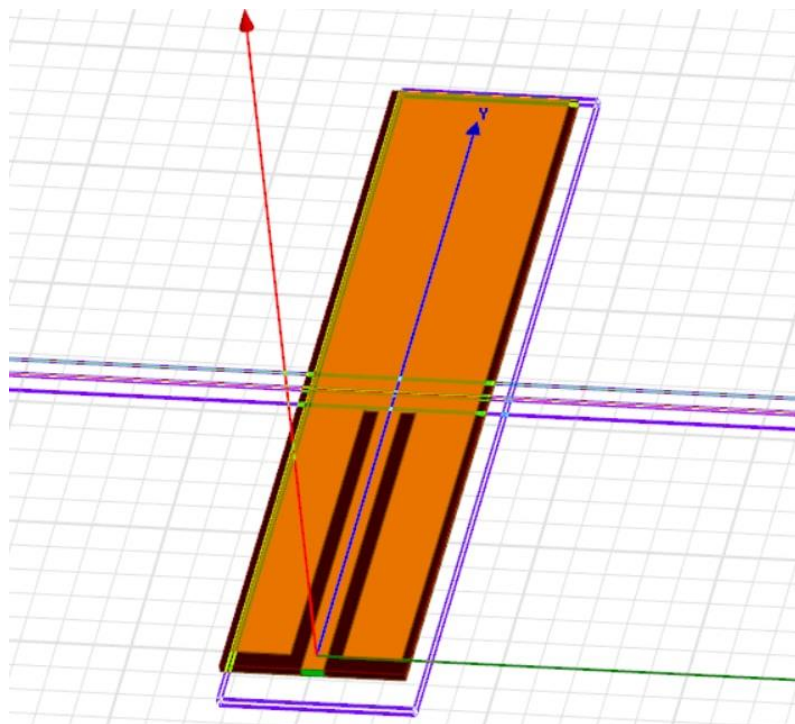


Рисунок 3.3 – Створення проекту широкосмугової друкованої патч-антени в пакеті програм ANSYS HFSS

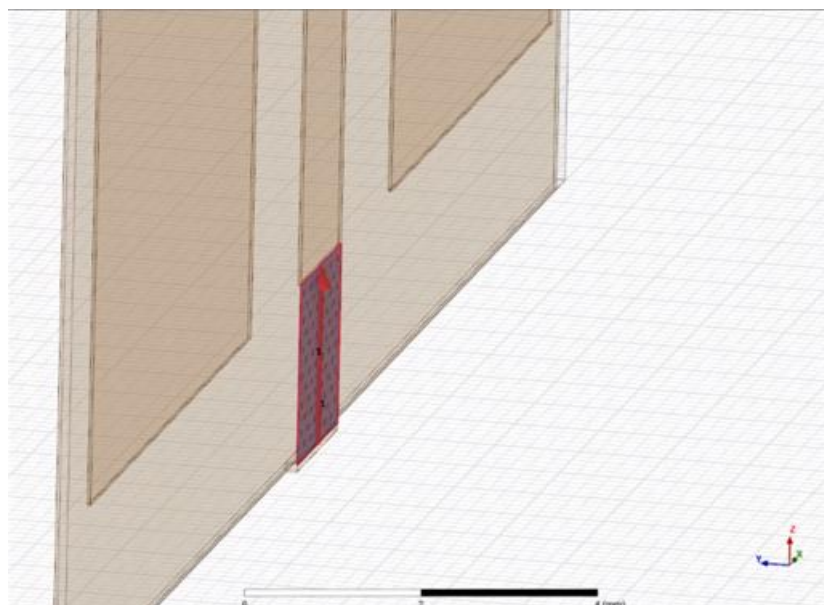


Рисунок 3.4 – Підключення «точки живлення» до антени

Задання параметрів «точки живлення» патч-антени наведено на рис. 3.5. У результаті моделювання було досліджено просторовий розподіл силових ліній поля випромінювання антени в діапазонах низьких (рис. 3.5), середніх (рис. 3.6) і високих (рис. 3.7) частот робочого діапазону.

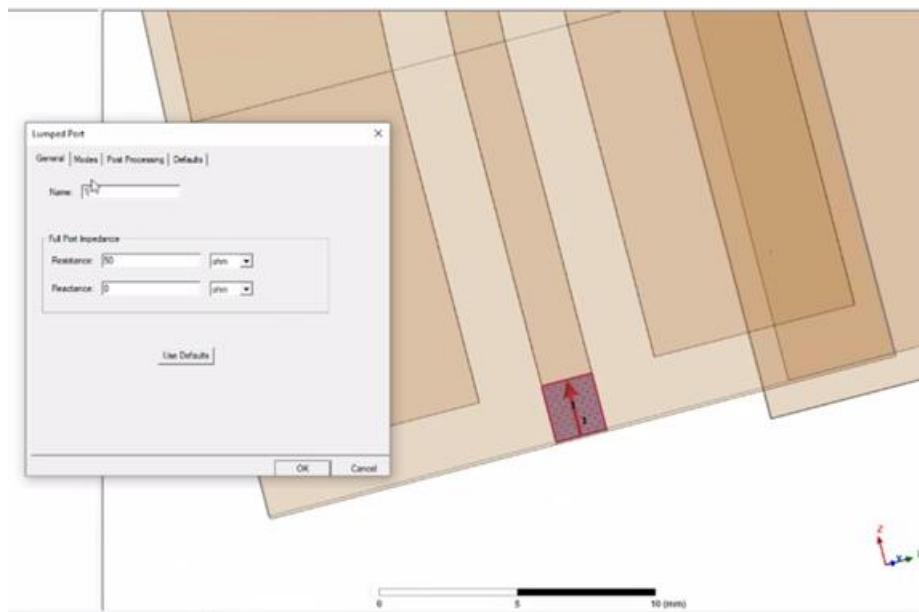


Рисунок 3.5 – Задання параметрів «точки живлення» патч-антени

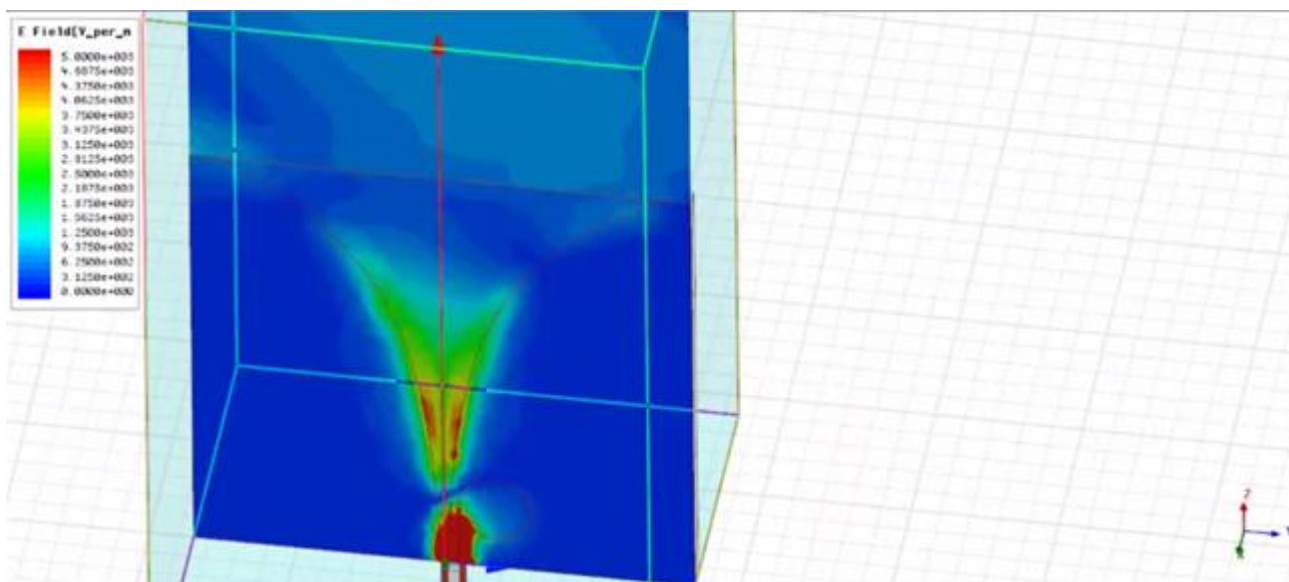


Рисунок 3.5 – Просторовий розподіл силових ліній поля випромінювання антени в діапазоні низьких частот

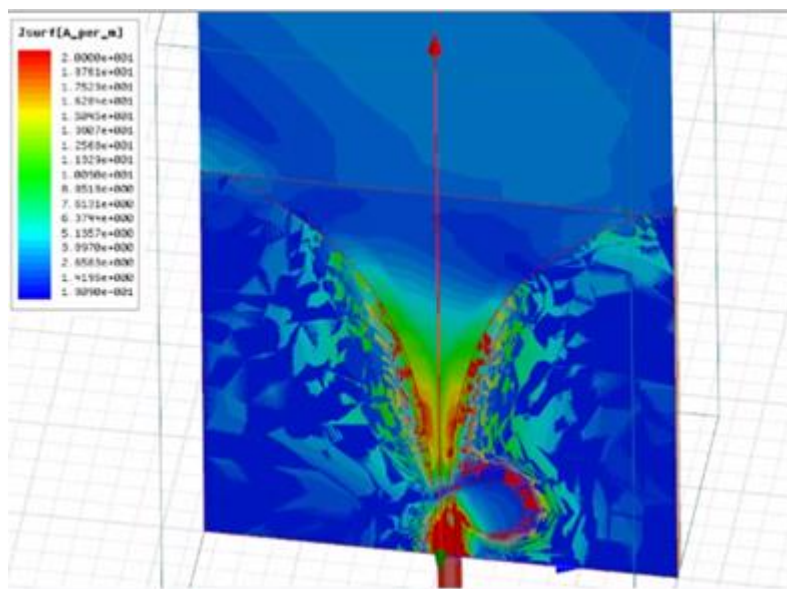


Рисунок 3.6 – Просторовий розподіл силових ліній поля випромінювання антени в діапазоні середніх частот

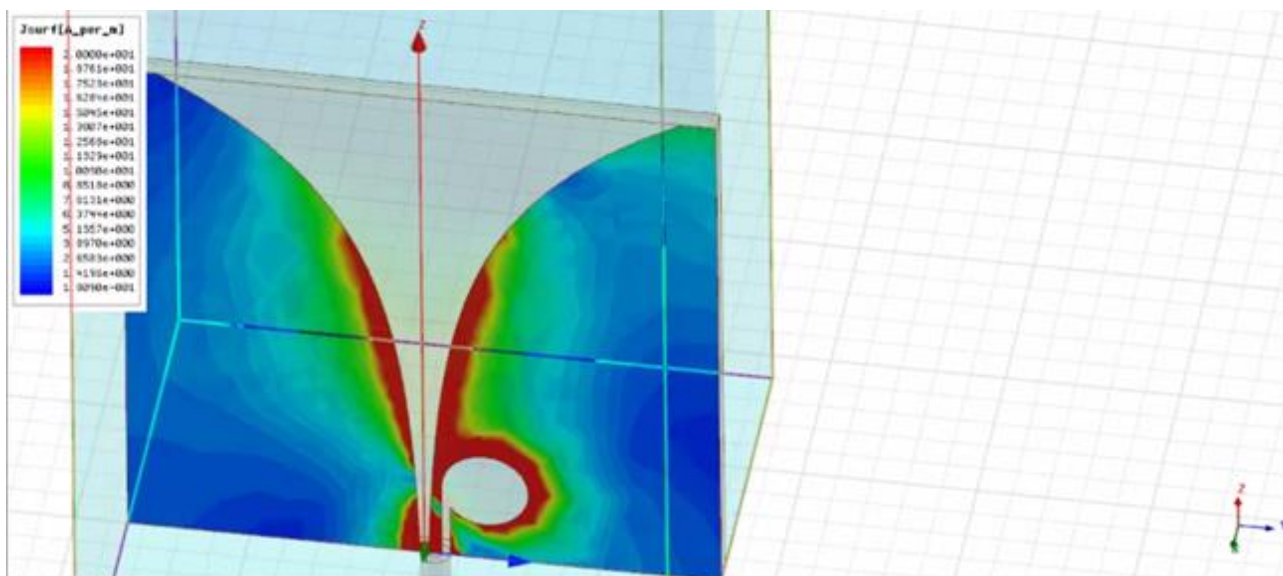


Рисунок 3.7 – Просторовий розподіл силових ліній поля випромінювання антени в діапазоні високих частот

3.3 Моделювання спрямованих характеристик широкосмугової друкованої антени в пакеті програм ANSYS HFSS

Моделювання спрямованих властивостей широкосмугової друкованої антени досліджено у просторі (рис. 3.9 – рис. 3.10) і в головних площинах.

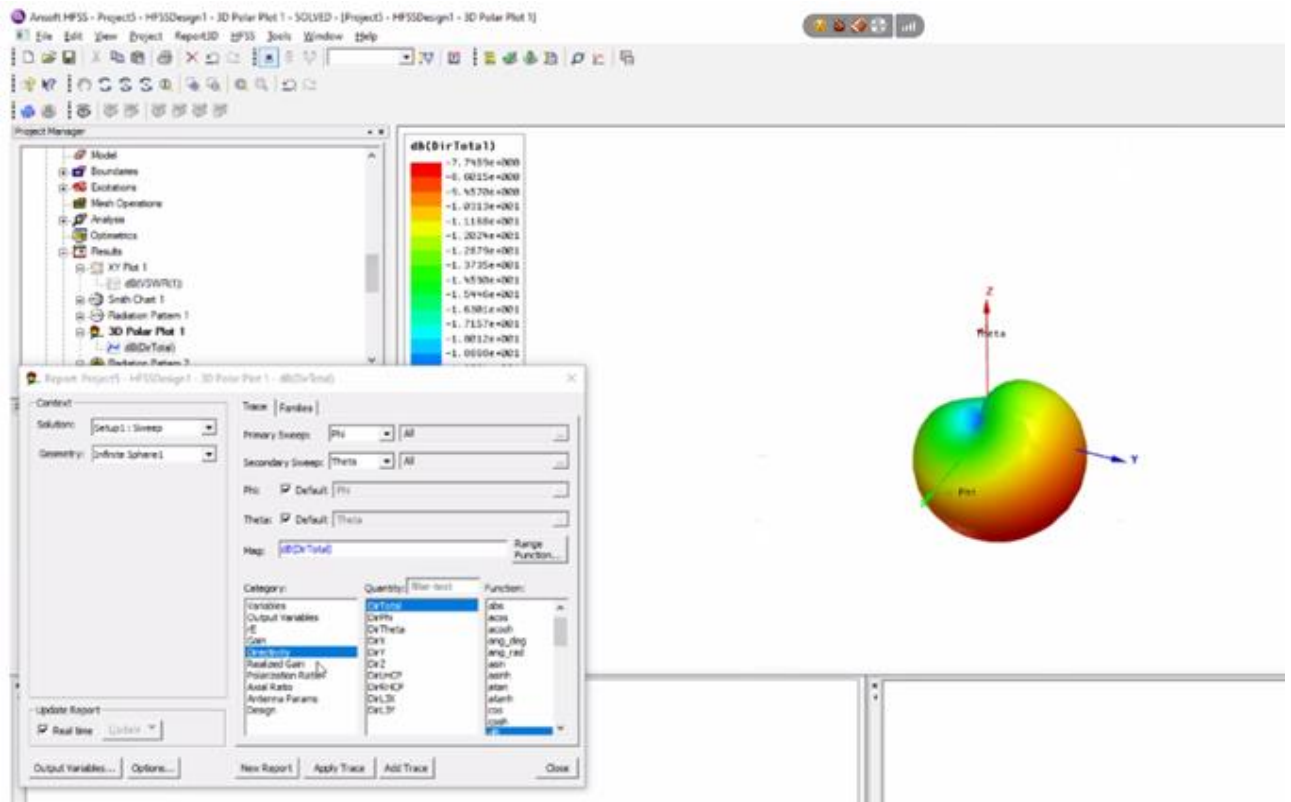


Рисунок 3.8 – Просторова діаграма спрямованості антени на частоті 900 МГц

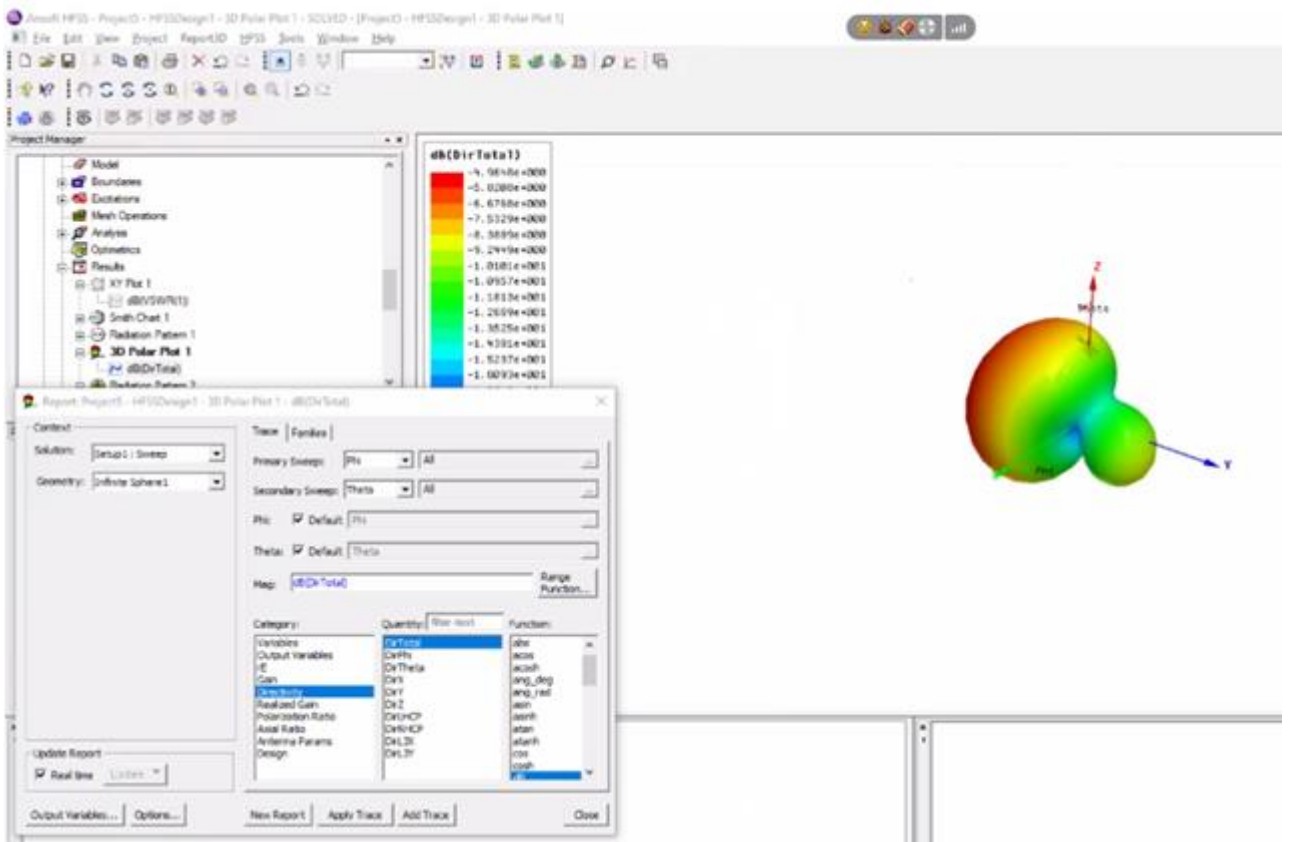


Рисунок 3.9 – Просторова діаграма спрямованості антени на частоті 1800 МГц

Просторова діаграма спрямованості ширкосмугової друкованої антени на частоті 900 МГц наведена на рис. 3.8. Просторова діаграма спрямованості ширкосмугової друкованої антени на частоті 1800 МГц наведена на рис. 3.9.

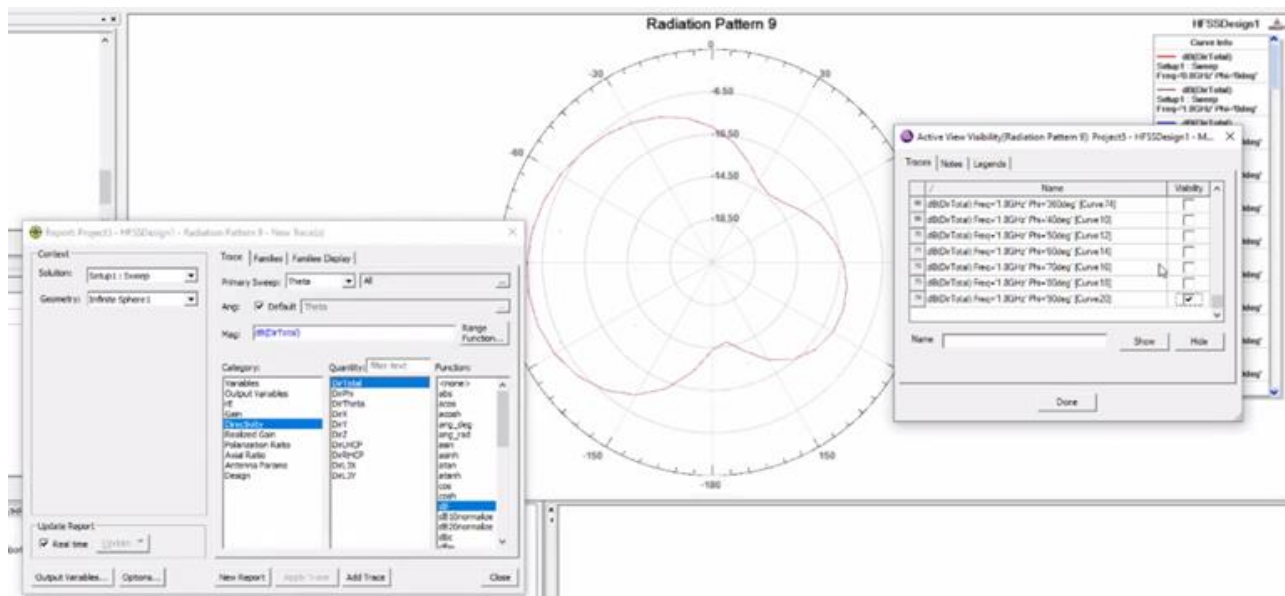


Рисунок 3.10 – Діаграма спрямованості ширкосмугової друкованої антени в горизонтальній площині на частоті 1800 МГц

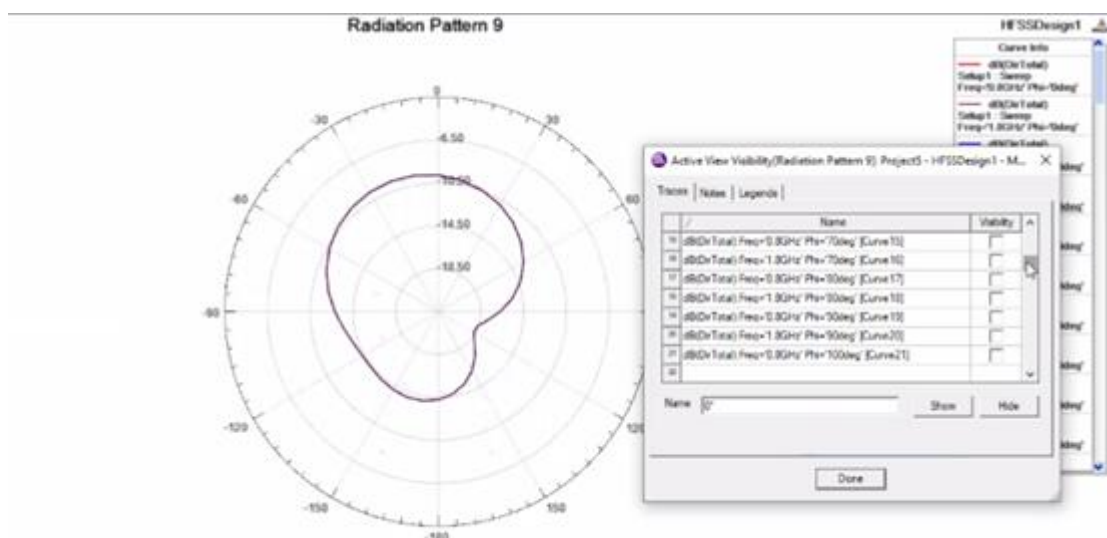


Рисунок 3.11 – Діаграма спрямованості ширкосмугової друкованої антени в горизонтальній площині на частоті 900 МГц

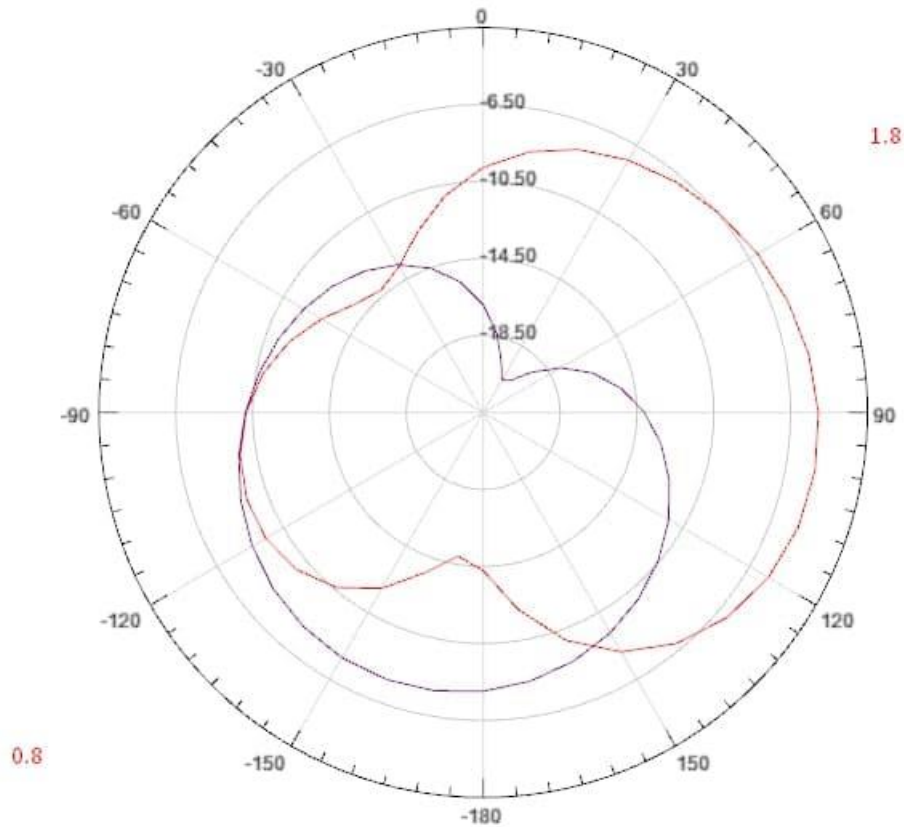


Рисунок 3.12 – Суміщена діаграма спрямованості в горизонтальній площині на частотах 900 і 1800 МГц

3.4 Дослідження енергетичних властивостей широкосмугової друкованої антени в пакеті програм ANSYS HFSS

Дослідження енергетичних і діапазонних властивостей широкосмугової друкованої антени проведено по значенню коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) у фідері антени. Згідно технічного завдання як фідер широкосмугової друкованої антени буде використано мікро-коаксіальний кабель. На рис. 3.13 наведено проект антени в програмі HFSS ANSYS. Результати моделювання частотної залежності КСХ наведені на рис. 3.14 – рис. 3.15 та наведено в додатку Е.

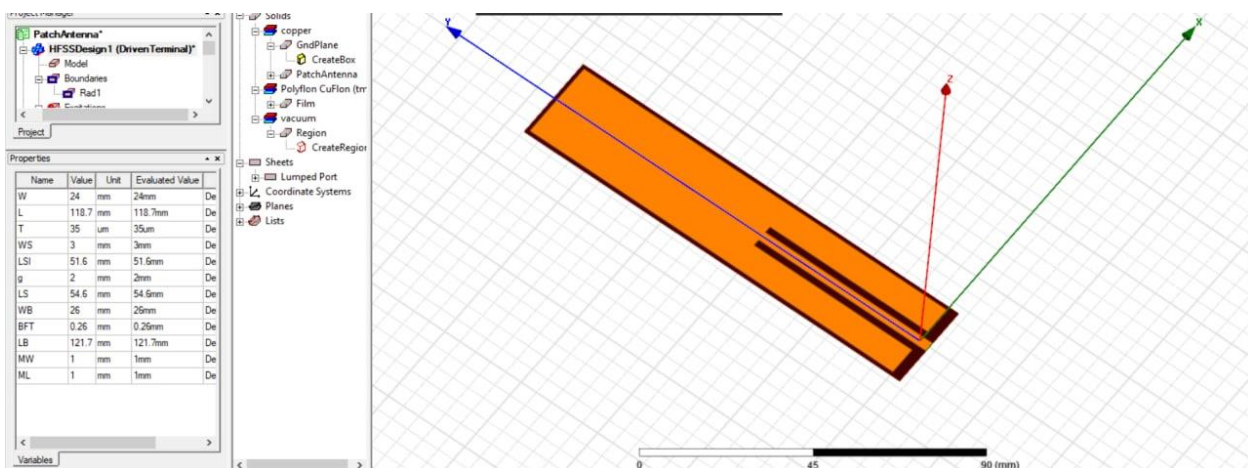


Рисунок 3.13 – Проект антени в програмі HFSS ANSYS

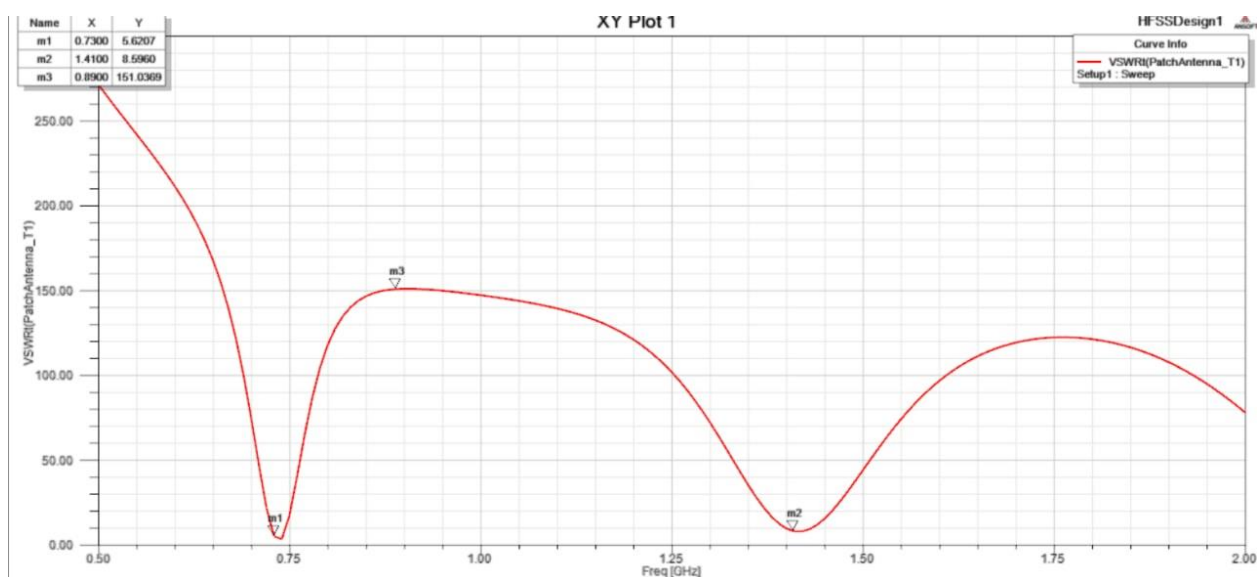


Рисунок 3.14 – Результати моделювання частотної залежності КСХ не оптимізованої антени

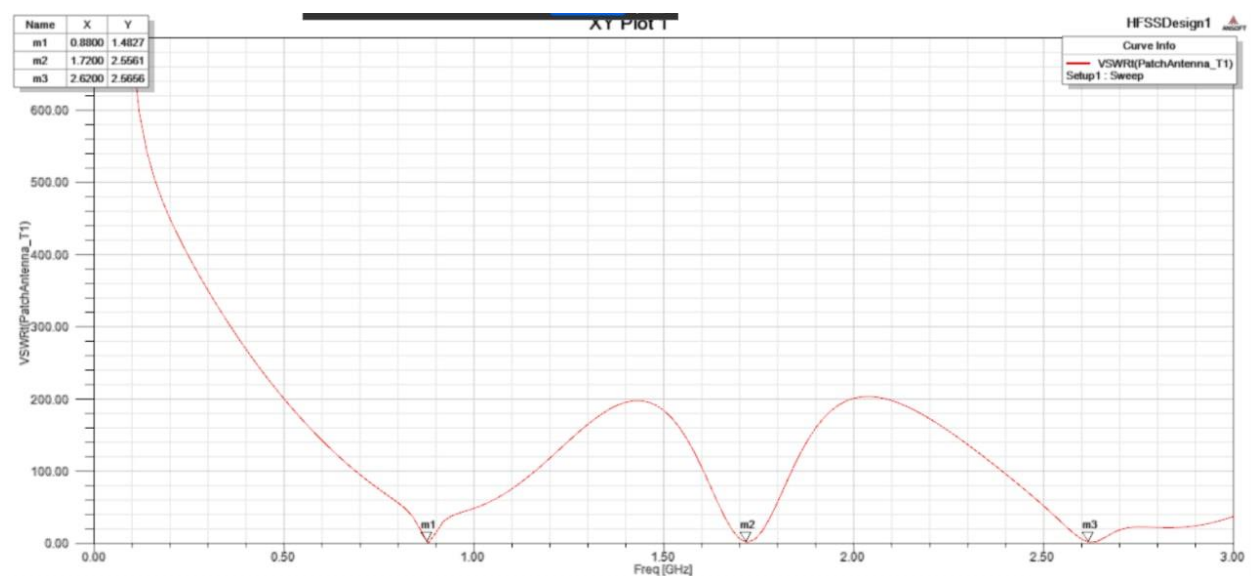


Рисунок 3.15 – Результати моделювання частотної залежності КСХ оптимізованої антени

3.5 Моделювання спрямованих характеристик ширококугової друкованої антени у зігнутому положенні

У роботі також було проведено моделювання спрямованих характеристик ширококугової друкованої антени у зігнутому положенні. Модель ширококугової друкованої антени у зігнутому положенні у програмі HFSS ANSYS показано на рис. 3.16 та наведено в додатку Ж.

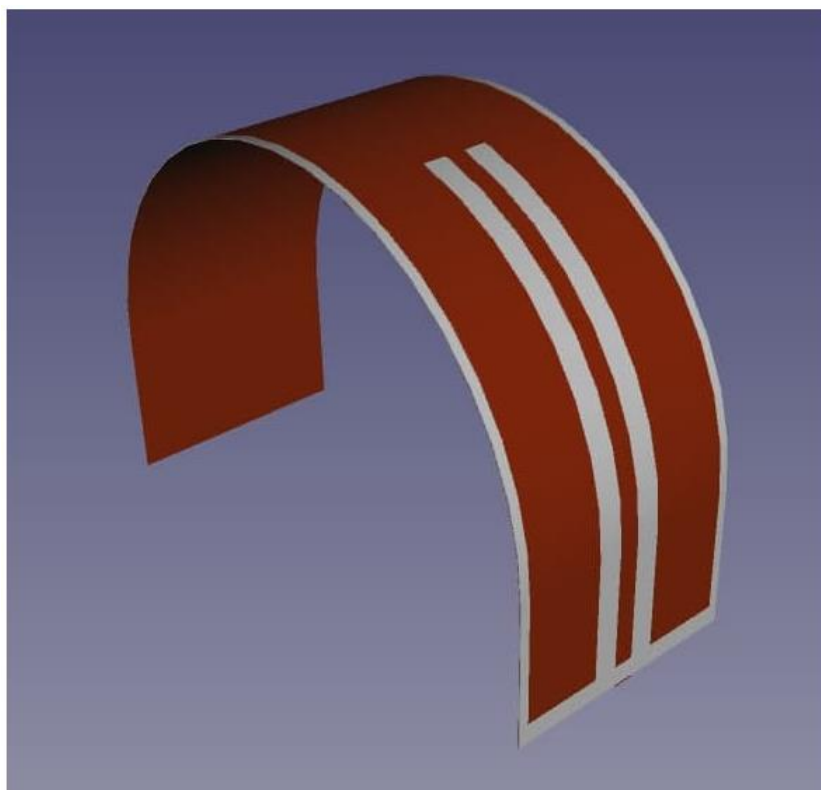


Рисунок 3.16 – Модель ширококугової друкованої антени у зігнутому положенні у програмі HFSS ANSYS

Результати моделювання спрямованих характеристик ширококугової друкованої антени у зігнутому положенні наведені на рис. 3.17 – рис. 3.18.

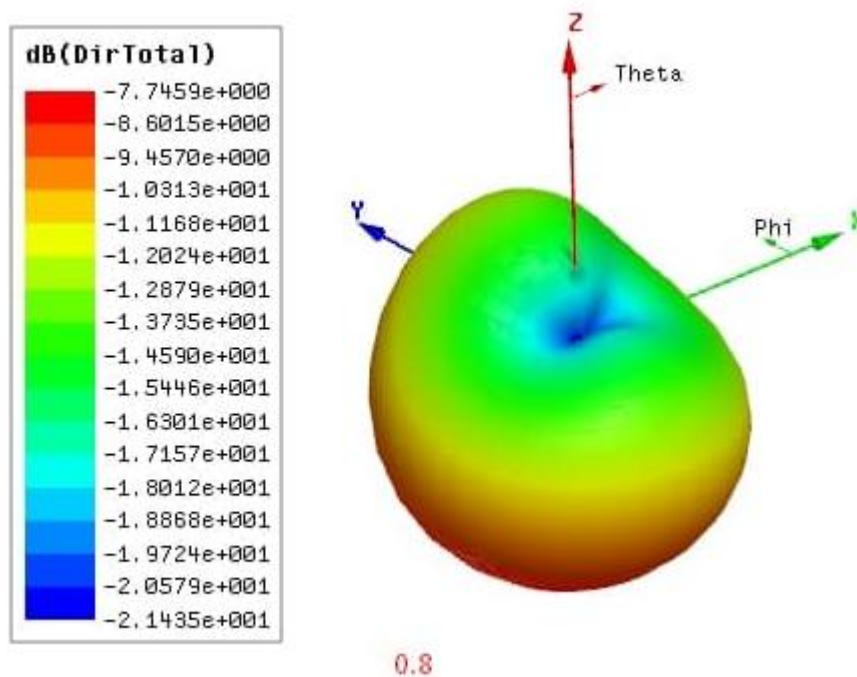


Рисунок 3.17 – Результати моделювання спрямованих характеристик широко-
мугової друкованої антени у зігнутому положенні на частоті 900 МГц

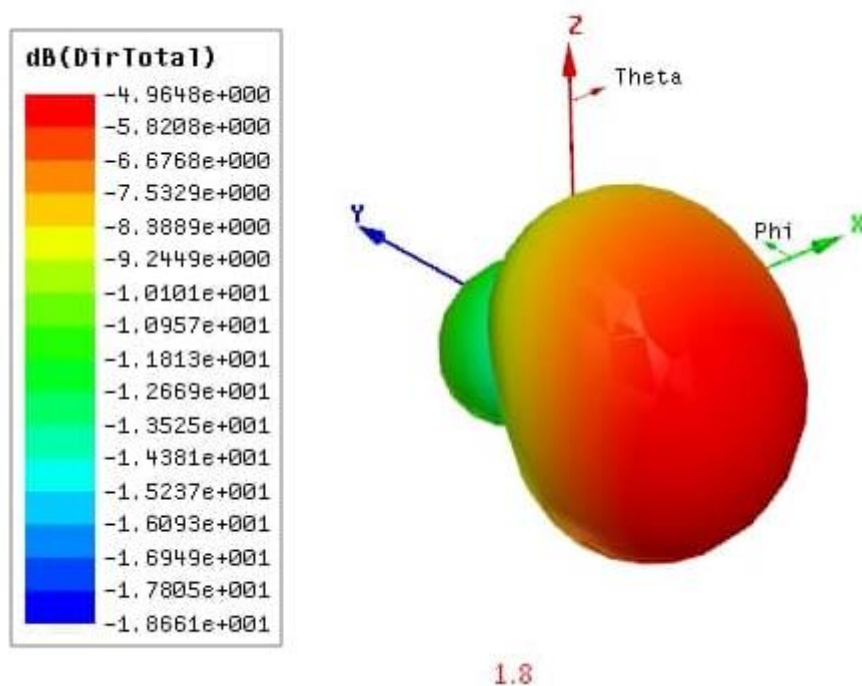


Рисунок 3.18 – Результати моделювання спрямованих характеристик широко-
мугової друкованої антени у зігнутому положенні на частоті 1800 МГц

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ШИРОСМУГОВОЇ ДРУКОВАНОЇ АНТЕНИ

Результати експериментальних досліджень ширкосмугової друкованої антени були отримані з використанням обладнання лабораторії 1306 кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету. На рис. 4.1. показано фото експериментального зразка гнучкої широкосмугової друкованої антени та наведено в додатку И.



Рисунок 4.1 – Фото експериментального зразка гнучкої широкосмугової друкованої антени

Фото підключення широкосмугової друкованої антени до обладнання для вимірювання частотної залежності КСХ наведено на рис. 4.2,а. Фото підключення широкосмугової друкованої антени до обладнання для вимірювання просторової діаграми спрямованості наведено на рис. 4.2,б. Фото точки живлення гнучкої широкосмугової друкованої антени наведено на рис. 4.3. Результати експериментальних досліджень антени при заповненні повітрям тефлонового стакану наведені на рис. 4.4. Результати експериментальних досліджень антени при заповненні мінеральною водою тефлонового стакану наведені на рис. 4.5 та наведено в додатку Л.



Рисунок 4.2 – Підключення широкосмугової друкованої антени до обладнання для вимірювання КСХ (а) та просторової ДС (б)



Рисунок 4.3 – Точка живлення гнучкої широкосмугової друкованої антени

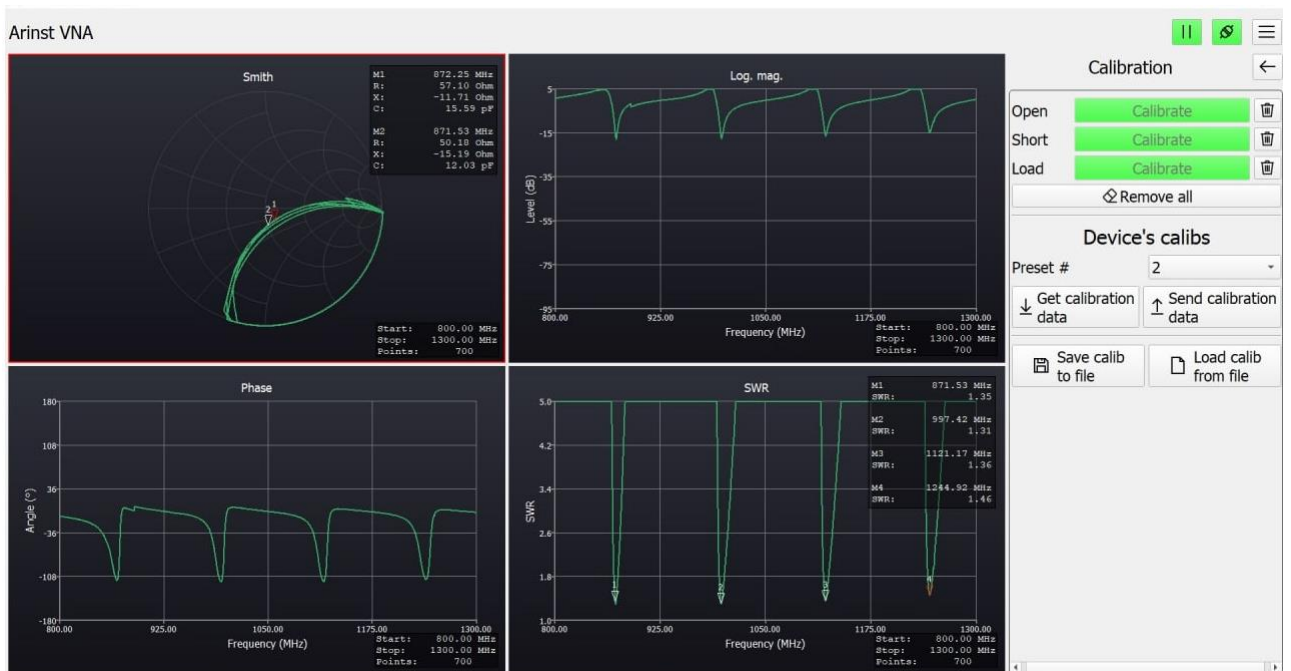


Рисунок 4.4 – Результати експериментальних досліджень антени при заповненні повітрям тefлонового стакану



Рисунок 4.5 – Результати експериментальних досліджень антени при заповненні мінеральною водою тefлонового стакану

Фото антени в зігнутому положенні на руці людини наведене на рис. 4.6 та наведено в додатку К.



(a)



(б)

Рисунок 4.6 – Фото антени в зігнутому положенні на руці людини

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка має право на існування та впровадження, якщо вона відповідає вимогам часу, як в напрямку науково-технічного прогресу та і в плані економіки. Тому для науково-дослідної роботи необхідно оцінювати економічну ефективність результатів виконаної роботи.

Магістерська кваліфікаційна робота з розробки та дослідження «Широко-смугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM» відноситься до науково-технічних робіт, які орієнтовані на виведення на ринок (або рішення про виведення науково-технічної розробки на ринок може бути прийнято у процесі проведення самої роботи), тобто коли відбувається так звана комерціалізація науково-технічної розробки. Цей напрямок є пріоритетним, оскільки результатами розробки можуть користуватися інші споживачі, отримуючи при цьому певний економічний ефект. Але для цього потрібно знайти потенційного інвестора, який би взявся за реалізацію цього проекту і переконати його в економічній доцільності такого кроку.

Для наведеного випадку нами мають бути виконані такі етапи робіт:

- 1) проведено комерційний аудит науково-технічної розробки, тобто встановлення її науково-технічного рівня та комерційного потенціалу;
- 2) розраховано витрати на здійснення науково-технічної розробки;
- 3) розрахована економічна ефективність науково-технічної розробки у випадку її впровадження і комерціалізації потенційним інвестором і проведено обґрунтування економічної доцільності комерціалізації потенційним інвестором.

5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Широко-смугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної

дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 5.1 [101].

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки)					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірше	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірше	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогах	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогах	Експлуатаційні витрати на рівні аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогах	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогах
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає
Практична здійсненність					

Продовження таблиці 5.1

8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наяв-	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї від-	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військовопромисловому	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти ро-	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання науково-технічного рівня та комерційного потенціалу науково-технічної розробки потрібно звести до таблиці.

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 5.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 5.3 [101].

Таблиця 5.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	5	5	5
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	2	2	2
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	3	3	3
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	2	3	3
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	2	2	3
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	4	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	3
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	4	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	3	2
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	2	2	2
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	4	3	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	3	3	3
Сума балів	35	36	37
Середньоарифметична сума балів CB_c	36,0		

Таблиця 5.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів CB_c , розрахована на основі висновків експертів	Науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки
41...48	Високий
31...40	Вище середнього
21...30	Середній
11...20	Нижче середнього
0...10	Низький

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Широкосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM» становить 36,0 бала, що, відповідно до таблиці 5.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

5.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки

Окрім комерційного аудиту розробки доцільно також розглянути технічний рівень якості розробки, розглянувши її основні технічні показники. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення розраховуємо за формулою [102]

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (5.1)$$

де k – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

α_i – коефіцієнт, який враховує питому вагу i -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт α_i визначається експертним шляхом і

при цьому має виконуватись умова $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$;

β_i – відносне значення i -го технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення β_i для різних випадків розраховуємо за такими формулами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (5.2)$$

де I_{ni} та I_{na} – чисельні значення конкретного i -го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки:

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}}; \quad (5.3)$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога.

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Частота максимальна	МГц	2700	1800	0,67	0,15
Імпеданс	Ом	50	50	1	0,2
Підсилення	Дб	4	5	1,25	0,3
Коефіцієнт стоячої хвилі	рази	1,8	1,8	1,11	0,2
Максимальна потужність	Вт	2	5	2,5	0,15

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення складе

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 0,67 \cdot 0,15 + 1 \cdot 0,2 + 1,25 \cdot 0,3 + 1,11 \cdot 0,2 + 2,5 \cdot 0,15 = 1,27.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,27 рази.

Реалізація визначеного рівня відповідних характеристик може бути досягнута різними шляхами. Перспективним напрямом у створенні антен стільникових телефонів є розробка компактних антен, що працюють у різних комбінаціях частотних діапазонів стільникових стандартів. При багатодіапазонній роботі мобільні телефони можуть експлуатуватися в різних країнах світу, де застосовуються різні стандарти. Тому випуск багатостандартних телефонів є економічно вигідним. З точки зору споживача, стільниковий телефон має бути компактним з підвищеною функціональністю та якістю зв'язку. Однією з найбільш габаритних частин телефону є його антена, та її характеристики спрямо-

ваності визначають якість зв'язку. Тому виникає необхідність суттєвого розширення функціональних можливостей антен телефонів мобільного зв'язку. Цим і обумовлений пошук шляхів створення антен мобільних телефонів, що відповідають вимогам стандартів 5G та 6G.

На початкових етапах розвитку стільникової телефонії широкого поширення набули спіральні антени, поєднані з несиметричним вібратором. Однак зовнішні антени мають цілу низку недоліків у порівнянні з мікросмушковими антенами, що не виступають. Тому розробники сучасних мобільних телефонів використовують лише друковану технологію виготовлення антен.

Мікросмушкова (друкована) антена є металевим провідником тієї чи іншої форми, що розташована над заземленою підкладкою. Вона може бути успішно поєднана з друкованою платою, на якій розташовані НВЧ каскади телефонної трубки. Є конструкції із паралельно розташованих багатосторонніх плат. У певній точці до мікросмушкової антени підключається приймач. У цій точці здійснюється підведення потужності від передавача та відведення прийнятого сигналу на вхід приймача.

Однією з найважливіших завдань, що виникають при проектуванні широкосмугових антен стільникових телефонів, є розробка форми антени, яка вдало вписувалася в корпус стільникового телефону, забезпечуючи при цьому необхідний коефіцієнт посилення. Жорсткі вимоги пред'являються і до форми ДН мобільного телефону. Вона має забезпечувати стійкий прийом із будь-якого ракурсу за умов міської забудови. Остання вимога легко реалізується при всепрямованій ДН, однак, згідно стандарту FCC, необхідно також забезпечити допустиму величину потужності, що поглинається в голові та руці людини, з тим, щоб гарантувати виконання санітарних норм з опромінення НВЧ потужністю.

Для ослаблення поля у напрямі людини доцільно використовувати мікросмушкові антени на екрані. Такі антени задовольняють санітарним нормам щодо опромінення, але не завжди мають необхідну форму ДН. Забезпечення доступу з будь-якого ракурсу легко досягається при напівсферичній формі ДН мікросмушкової антени. Однак таку форму складно реалізувати на практиці. Для

якісного прийому сигналів у РН не повинно бути великих провалів під час використання телефону на відкритій місцевості. В умовах міської забудови ця вимога до форми ДН не є критичною через складну дифракційну картину електромагнітних хвиль. І тут поляризаційна характеристика може мати довільну форму, т.к. при багаторазовому перевідображенні від будівель та інших об'єктів сигнали, що приймаються антеною стільникового телефону, матимуть різну поляризацію.

Розширення функціональних можливостей мобільного телефону призводить до необхідності збільшення числа робочих діапазонів частот. При цьому ускладнюється конструкція та використовуються багат шарові друкарські структури. Моделювання таких структур доцільно проводити за допомогою програмних продуктів, що застосовуються для розрахунку двовимірних та тривимірних антен та пристроїв НВЧ.

5.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Широкосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.3.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [101]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.4)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=22$ дні.

$$Z_o = 12500,00 \cdot 12 / 22 = 6818,18 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.5 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту	12500,00	568,18	12	6818,18
Науковий співробітник	11500,00	522,73	6	3136,36
Інженер-розробник теле-комунікаційних мереж	11500,00	522,73	12	6272,73
Інженер-радіотехнік	11500,00	522,73	6	3136,36
Технік	7000,00	318,18	10	3181,82
Всього				22545,45

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Широкосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.5)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.6)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=2379,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [101];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 2379,00 \cdot 1,10 \cdot 1,65 / (22 \cdot 8) = 24,53 \text{ грн.}$$

$$З_{р1} = 24,53 \cdot 5,00 = 122,67 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.6 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
Установка обладнання для проведення досліджень	5,00	2	1,10	24,53	122,67
Підготовка робочого місця розробника ширококутної друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM	10,00	3	1,35	30,11	301,09

Продовження таблиці 5.6

Встановлення програмного забезпечення розробки електронних схем	5,00	4	1,50	33,45	167,27
Підготовка бази даних	8,00	3	1,35	30,11	240,87
Монтаж компонентів друкованої антени	8,00	5	1,70	37,92	303,32
Випробування компонентів експериментальних блоків	6,00	5	1,70	37,92	227,49
Налагодження системи	5,50	6	2,00	44,61	245,33
Технічна підтримка експериментів	11,00	3	1,35	30,11	331,20
Всього					1939,26

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.7)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{дод}} = (22545,45 + 1939,26) \cdot 10 / 100\% = 2448,47 \text{ грн.}$$

5.3.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.8)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (22545,45 + 1939,26 + 2448,47) \cdot 22 / 100\% = 5925,30 \text{ (грн).}$$

5.3.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Широкопasmова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM».

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (5.9)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,00 \cdot 98,00 \cdot 1,11 - 0,000 \cdot 0,00 = 326,34 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Багатофункціональний білий офісний папір Cristal pro80-500 A4	98,00	3,00	0,000	0,00	326,34
Папір для записів Cristal 70 A5-250	46,00	3,00	0,000	0,00	153,18
Тека Cristal Office	120,00	2,00	0,000	0,00	266,40
Набір офісний	210,00	3,00	0,000	0,00	699,30

Продовження таблиці 5.7

DATUM 300					
Картридж для принтера HP-5100	1020,00	1,00	0,000	0,00	1132,20
Склотекстоліт СТФ 2 – 1.5 ДЕСТ 102-78	135,20	0,06	0,000	0,00	9,00
Припой ПОС-61 ДЕСТ 21931-86	350,00	0,01	0,000	0,00	4,27
Флюс ФКСП ОСТ	120,00	0,01	0,000	0,00	1,86
Міні-коаксіальний кабель діаметром 1,13 мм довжиною	1,50	0,15	0,000	0,00	0,25
Всього					2592,81

5.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Широкопasmова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.10)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_6 = 1 \cdot 5,00 \cdot 1,11 = 5,55 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.8 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Мікрохвильовий роз'єм IPEX MHF1 (u.FL)	1	5,00	5,55
Всього			5,55

5.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.11)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 4300,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 4773,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Випромінювач частот діапазону GSM	1	4300,00	4773,00
Приймач частот діапазону GSM	1	2900,00	3219,00
Всього			7992,00

5.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inprz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (5.12)$$

де C_{inprz} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 5630,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 6249,30 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
ОС Windows	1	5630,00	6249,30
Прикладний пакет Microsoft Office	1	5140,00	5705,40
Прикладний пакет моделювання процесів MatLab	1	7640,00	8480,40
Всього			20435,10

5.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{C_{об}}{T_{г}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.13)$$

де $C_{об}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{г}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (25300,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 1054,17 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер ПЕОМ	25300,00	2	1	1054,17
Обчислювальний комплекс обробки даних	22450,00	2	1	935,42
Робоче місце розробника	9500,00	5	1	158,33
Пристрій графічного виводу інформації	8700,00	4	1	181,25
Оргтехніка	8900,00	4	1	185,42
Приміщення лабораторії	280000,00	25	1	933,33
Частотомір цифровий ЧМ-СЦ12	6700,00	4	1	139,58
Генератор еталонної частоти ГЧ-1880	9300,00	4	1	193,75
Телефон стільниковий	6800,00	3	1	188,89
Всього				3970,14

5.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{\text{вн}i}}{\eta_i}, \quad (5.14)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 4,50$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,20 \cdot 165,0 \cdot 4,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 148,50 \text{ (грн)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.12 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер ПЕОМ	0,20	165,0	148,50
Обчислювальний комплекс обробки даних	0,25	165,0	185,63
Робоче місце розробника	0,15	110,0	74,25
Пристрій графічного виводу інформації	0,40	9,0	16,20
Оргтехніка	0,56	5,0	12,60
Частотомір цифровий ЧМ-СЦ12	0,10	80,0	36,00
Генератор еталонної частоти ГЧ-1880	0,26	80,0	93,60
Випромінювач частот діапазону GSM	0,05	40,0	9,00
Приймач частот діапазону GSM	0,01	40,0	1,80
Всього			577,58

5.3.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Ширококутова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{ce} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ce}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де H_{ce} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», приймемо $H_{ce} = 24\%$.

$$B_{ce} = (22545,45 + 1939,26) \cdot 24 / 100\% = 5876,33 \text{ грн.}$$

5.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», приймемо $H_{cn} = 36\%$.

$$B_{cn} = (22545,45 + 1939,26) \cdot 36 / 100\% = 8814,50 \text{ (грн).}$$

5.3.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.17)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», приймемо $H_{ie} = 64\%$.

$$I_e = (22545,45 + 1939,26) \cdot 64 / 100\% = 15670,22 \text{ (грн).}$$

5.3.12 Накладні (загально виробничі) витрати

До статті «Накладні (загально виробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загально виробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.18)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загально виробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 112\%$.

$$B_{нзв} = (22545,45 + 1939,26) \cdot 112 / 100\% = 27422,88 \text{ (грн)}.$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Ширококутова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{дод} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (5.19)$$

$$B_{заг} = 22545,45 + 1939,26 + 2448,47 + 5925,300126 + 2592,81 + 5,55 + 7992,00 + 20435,10 + 3970,14 + 577,58 + 5876,33 + 8814,50 + 15670,22 + 27422,88 = 126215,58 \text{ (грн)}.$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.20)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,9$.

$$ЗВ = 126215,58 / 0,9 = 140239,53 \text{ (грн)}.$$

5.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів тієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Широкосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

ΔN – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	5000	8000	9000	5000

N – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 25000 осіб;

C_o – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 90,00 грн;

$\pm \Delta C_o$ – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 10,00 грн.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta\Pi_i$ для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [101]

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right), \quad (5.21)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2021 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).
Прийmemo $\rho = 25\%$;

ϑ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2021 році $\vartheta = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = (10,00 \cdot 25000,00 + 100,00 \cdot 5000) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 127586,98 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (10,00 \cdot 25000,00 + 100,00 \cdot 13000) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 263700,17 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (10,00 \cdot 25000,00 + 100,00 \cdot 22000) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 416827,51 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (10,00 \cdot 25000,00 + 100,00 \cdot 27000) \cdot 0,83 \cdot 0,25 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 501898,26 \text{ грн.}$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків $ПП$, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^i}, \quad (5.22)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн;

T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau=0,12$;

t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} \text{ПП} &= 127586,98/(1+0,12)^1 + 263700,17/(1+0,12)^2 + 416827,51/(1+0,12)^3 + \\ &+ 501898,26/(1+0,12)^4 = 113916,94 + 210220,16 + 296689,59 + 318965,42 = \\ &= 939792,12 \text{ (грн)}. \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки:

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (5.23)$$

де $k_{инв}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо $k_{инв}=2$;

$3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 140239,53 грн.

$$PV = k_{инв} \cdot 3B = 2 \cdot 140239,53 = 280479,06 \text{ грн.}$$

Абсолютний економічний ефект $E_{абс}$ для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме

$$E_{абс} = \text{ПП} - PV \quad (5.24)$$

де $ПП$ – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливо-го впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 939792,12 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 280479,06 грн.

$$E_{abc} = ПП - PV = 939792,12 - 280479,06 = 659313,06 \text{ грн.}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій E_e , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$E_e = T_{жс} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (5.25)$$

де E_{abc} – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 659313,06 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 280479,06 грн;

$T_{жс}$ – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримання позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_e = T_{жс} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1 = (1 + 659313,06/280479,06)^{1/4} = 0,35.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій τ_{min} :

$$\tau_{min} = d + f, \quad (5.26)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2021 році в Україні $d = 0,1$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, прийmemo 0,1.

$\tau_{min} = 0,1 + 0,1 = 0,2 < 0,35$ свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій E_e , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у

впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Широкопосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM» доцільно.

Період окупності інвестицій $T_{ок}$ які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g}, \quad (5.27)$$

де E_g – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 0,35 = 2,83 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

5.5 Висновки до розділу

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Широкопосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM» становить 36,0 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,27 рази.

Також термін окупності становить 2,83 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонука-

ти потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Широкосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM».

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Безпека праці виступає і як один з факторів, які забезпечують високу продуктивність праці. Доведено, що висока продуктивність праці може бути досягнута тільки в умовах, коли забезпечена її безпека.

Міжнародний досвід засвідчує, що організація праці, яка ігнорує вимоги гігієни і безпеки праці, підриває економічну ефективність підприємств і не може бути основою для сталої стратегії їх розвитку. В концепції ООН про «сталий людський розвиток» безпека праці розглядається як одна із основних (базових) потреб людини.

На працівників, що проводять роботи з широкосмуговою друкованою антеною можуть впливати такі небезпечні та шкідливі фактори, у відповідності з прийнятою класифікацією за ГОСТ 12.0003.-74 [103].

Фізичні:

підвищена та понижена температура повітря робочої зони;

підвищена та понижена рухливість повітря робочої зони;

недостатня освітленість робочої зони;

недостатність природного освітлення;

небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутися через тіло людини;

підвищена та понижена вологість повітря; підвищений рівень електромагнітного опромінення.

Психофізіологічні:

нервово – психічні перевантаження (монотонність праці, емоційні перевантаження, перенапруга аналізаторів).

Магістерська робота досліджує підвищення швидкості оптичних приймачів для мультисервісних мереж нового покоління, тому описані вимоги безпечної роботи з джерелами електромагнітних випромінювань.

6.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт

6.1.1 Технічні рішення з організації робочого місця під час роботи з широкосмуговою друкованою антеною (джерелом електромагнітного випромінювання)

При невідповідності вимогам норм у залежності від робочого діапазону частот, характеру виконуваних робіт, рівня опромінення і необхідної ефективності захисту застосовують наступні способи та засоби захисту або їх комбінації: захист часом та відстанню; зменшення параметрів випромінювання безпосередньо в самому джерелі випромінювання; екранування джерела випромінювання; екранування робочого місця; раціональне розташування установок в робочому приміщенні; встановлення раціональних режимів експлуатації установок та роботи обслуговуючого персоналу; застосування засобів попереджувальної сигналізації (світлова, звукова тощо); виділення зон випромінювання; застосування засобів індивідуального захисту. Захист часом передбачає обмеження часу перебування людини в робочій зоні, якщо інтенсивність опромінення перевищує норми, встановлені за умови опромінення на протязі зміни, і застосовується, коли немає можливості зменшити інтенсивність опромінення до допустимих значень і тільки для випромінювань в діапазоні 300 МГц – 300 ГГц, а також для електростатичного та електричного поля частотою 50 Гц. Допустимий час перебування залежить від інтенсивності опромінення. Захист відстанню застосовується коли неможливо послабити інтенсивність опромінення іншими заходами, у тому числі й скороченням часу перебування людини в небезпечній зоні. В цьому випадку збільшують відстань між джерелом випромінювання і обслуговуючим персоналом. Цей вид захисту ґрунтується на швидкому зменшенні інтенсивності поля з відстанню. Електромагнітна енергія, випромінювана окремими елементами електротермічних установок та радіотехнічної апаратури, при відсутності екранів (настроювання, регулювання, випробування) поширюється в приміщенні, відбивається від стін та перекриттів, частково проходить крізь них і трохи розсіюється в них. В результаті утворення стоячих

хвиль в приміщенні можуть створюватися зони з підвищеною густиною ЕМВ. Тому роботи рекомендується проводити в кутових приміщеннях першого та останнього поверхів будинків. Для захисту персоналу від опроміненень потужними джерелами ЕМВ поза приміщеннями необхідно раціонально планувати територію радіоцентру, виносити служби за межі антенного поля, встановлювати безпечні маршрути руху людей, екранувати окремі будівлі та ділянки території. Зони опромінення виділяються на основі інструментальних вимірювань інтенсивності опромінення для кожного конкретного випадку розташування апаратури. Установки огорожують або границю зони позначають яскравою фарбою на підлозі приміщення, передбачаються сигнальні кольори та знаки безпеки відповідно до ГОСТ12.3.026-76. Для захисту очей від ЕМВ призначені захисні окуляри з металізованими скельцями типу ЗП5-80 (ГОСТ 12.4.013-75). Поверхня одношарових скелець повернута до ока, покрита безколірною прозорою плівкою двоокису олова, яка дає ослаблення електромагнітної енергії до 30 дБ при пропусканні світла не менше 75 %. Для контролю рівнів ЕМП застосовують різні вимірювальні прилади у залежності від діапазону частот. Вимірювання проводять в зоні перебування персоналу від рівня підлоги до висоти 2 м через кожні 0,5 м.

6.1.2 Електробезпека

Для забезпечення електробезпеки застосовують окремо або у поєднанні один з іншим наступні технічні способи та засоби: захисне заземлення, занулення.

Захисним заземленням називається навмисний електричний контакт із землею або її еквівалентом металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою при замиканні на корпус та через інші причини. Завдання захисного заземлення – усунення небезпеки ураження струмом у випадку доторкання до корпусу та інших струмоведучих металевих частин електроустановки, що опинилися під напругою. Захисне заземлення застосовують у трифазних мережах з ізольованою нейтраллю.

Принцип дії захисного заземлення – зменшення напруги між корпусом, що опинився під напругою, та землею до безпечного значення. У якості провідників заземлення дозволяється використовувати різні металеві конструкції: ферми, шахти ліфтів, підйомників, сталеві труби електропроводок, відкрито прокладені стаціонарні трубопроводи різного призначення (крім трубопроводів горючих та вибухонебезпечних газів, каналізації і центрального опалення).

Зануленням називається навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих не струмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок замикання на корпус та через інші причини. Завдання занулення – усунення небезпеки ураження струмом у випадку контакту з корпусом та іншими неструмоведучими металевими частинами електроустановки, що опинилися під напругою внаслідок замикання на корпус. Вирішується це завдання швидким вимкненням пошкодженої електроустановки із мережі. Принцип дії занулення – перетворення замикання на корпус в однофазне коротке замикання (тобто замикання між фазними та нульовими проводами) з метою викликати більший струм, здатний забезпечити спрацьовування захисту і цим самим автоматично вимкнути пошкоджену установку із мережі живлення. Таким захистом можуть бути плавкі запобіжники, магнітні пускачі з тепловим захистом, контактори у поєднанні з тепловими реле, автомати, що здійснюють захист одночасно від струмів короткого замикання та від перевантаження.

Класифікація приміщень за категоріями електробезпеки залежно від мікроклімату виробничих будівель. Допустимими визнаються умови праці у будівлях, де відносна вологість повітря не перевищує 60%, температура повітря не перевищує 35 °С, а пил та хімічно агресивне середовище – відсутні.

Для створення оптимальних умов електробезпеки в робочому приміщенні потрібно підтримувати режим вологості повітря на рівні 60%, для того щоб приміщення було сухим, та температуру повітря не вище 35°С. Постійний моніторинг середовища, на предмет пилу та хімічно агресивних речовин у складі повітря, для забезпечення електробезпеки приміщення, використання заземлення електропристроїв, використання маркувань на джерелах електроенергії.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Метеорологічні умови(мікроклімат) виробничих приміщень (санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042–99) можна оцінювати за сукупністю таких факторів, як температура (t , °C), відносна вологість (ϕ , %), швидкість руху повітря (V , м/с) та величина інтенсивності теплового опромінення (E , Вт/м²). Крім цих параметрів іноді виникає потреба враховувати атмосферний тиск (роботи під водою тощо), який впливає на парціальний тиск основних компонентів повітря. За ступенем впливу на тепловий стан людини мікрокліматичної умови поділяють на оптимальні та допустимі. Оптимальні мікрокліматичні умови – поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину забезпечують зберігання нормального теплового стану організму без активізації механізмів терморегуляції. Вони забезпечують відчуття теплового комфорту та створюють передумови для високого рівня працездатності [3].

Категорія робіт – розмежування робіт за важкістю на основі загальних енерговитрат організму[3]. Легкі фізичні роботи (категорія І) охоплюють види діяльності, при яких витрата енергії дорівнює 105–140 Вт (90–120 ккал/год.) – категорія Іа та 141–175 Вт (121–150 ккал/год.) – категорія Іб. До категорії Іа належать роботи, що виконуються сидячи і не потребують фізичного напруження. До категорії Іб належать роботи, що виконуються сидячи, стоячи або пов'язані з ходінням та супроводжуються деяким фізичним напруженням.

Категорію робіт визначаємо як Іб. Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [105].

Допустимі параметри мікроклімату наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С Допустима		Відносна вологість	Швидкість руху, X
		Верхня межа	Нижня межа		
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	не більше 0,2
Теплий		21-28	19-30	55 при 27 °С	0,1-0,3

Мікрокліматичні умови виконують важливу роль в якості виконання роботи працівником та в безпеці його трудової діяльності. Для дотримання мікрокліматичних умов застосовуємо системи кондиціонування повітря та організація режиму прибирання.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачені наступні рішення:

- застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами , які встановленні безпосередньо на дільницях біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення;
- необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні;
- застосовувати природну вентиляцію: організовану і неорганізовану.

6.2.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [106] Система природного освітлення відноситься до бокової. Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0	IV	б	середній	середній	200	500	4	1,5	2,4	0,9

Для забезпечення достатнього освітлення слід максимально використовувати бічне природного освітлення, систематично очищувати скло від бруду та використовувати світлодіодні лампи відповідної до параметрів приміщення потужності.

6.2.4 Виробничий шум

Шум — це механічне коливання часток пружного середовища, що виникає під дією будь-якої збуджуючої сили. При цьому звуком називають регулярні періодичні коливання, шумом — неперіодичні, випадкові коливальні процеси.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [108]. За цими нормами рівень шуму не може перевищувати 65 Дб.

Існують такі способи боротьби з шумом механічного походження та вібрацією:

- зменшення шуму та вібрації безпосередньо в джерелах їх виникнення, застосовуючи обладнання, що не утворює шуму, замінюючи ударні технологічні процеси безударними, застосовуючи деталі із матеріалів з високим коефіцієн-

том внутрішнього тертя (пластмаса, гума, деревина та ін), підшипники ковзання замість кочення, косозубі та шевронні зубчасті передачі замість прямозубих, проводячи своєчасне обслуговування та ремонт елементів, що створюють шум та ін.;

- зменшення шуму та вібрації на шляхах їх розповсюдження заходами звуко- та віброізоляції, а також вібро- та звукопоглинання;
- зменшення шкідливої дії шуму та вібрації, застосовуючи індивідуальні засоби захисту та запроваджуючи раціональні режими праці та відпочинку.

Одним з найпростіших та економічно доцільних способів зниження шуму є застосування методів звукоізоляції та звукопоглинання також потрібно звернути увагу на вибір робочого обладнання.

6.2.5 Електромагнітні випромінювання

Електромагнітні поля мають потужний вплив на людський організм. Вони негативно впливають майже на усі системи організму. Тому треба створювати певні методи захисту від їх дії. Найпоширенішими з таких методів є такі:

- зменшення щільності потоку енергії, якщо дозволяє даний технологічний процес або обладнання.
- захист часом (тобто обмеження часу знаходження у зоні джерела ЕМП).
- захист відстанню.
- екранування робочого місця чи джерела.
- раціональне планування робочого місця.
- застосування засобів попереджувальної сигналізації.
- застосування засобів особистого захисту.

Для зменшення впливу електромагнітних полів на персонал, який знаходиться у зоні дії деяких радіоелектронних засобів необхідним є ряд захисних заходів: організаційні, інженерно-технічні та лікувально-профілактичні.

Треба заздалегідь попідкуватися про зменшення часу перебування персоналу у зоні опромінення. Потужність джерел випромінювання повинна бути

найменшою з можливих. Додержання режиму праці відпочинку дає найбільший результат в боротьбі зі шкідливим впливом випромінювань.

6.2.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори небезпеки – чинники, обумовлені особливостями фізіології та психології людини, що можуть завдати їй шкоди за певних обставин.

Небезпечні та шкідливі психофізіологічні виробничі чинники залежно від характеру дії поділяють на такі групи:

- фізичні перевантаження (статичні, динамічні);
- нервово-психічні перевантаження (розумові перевантаження, перевантаження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження)

Психофізіологічні фактори вибираються відповідно з Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу [108].

Психофізіологічні фактори при роботі з ПК:

- перенапруження зорових аналізаторів;
- монотонність трудового процесу;
- розумове перенапруження;
- нервово-емоційні перевантаження.

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

Зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом;

Сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій;

Розподіл функцій за ступенем складності завдання - обробка, контроль, перевірка завдання.

Сенсорні навантаження:

Зосередження (%за зміну) – до 50%;

Щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150;

Навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80 %;

Навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25%.

Емоційне навантаження:

Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний;

Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших.

Режим праці:

Тривалість робочого дня – більше 8 год;

Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

При плануванні графіку робочого часу враховуються вищенаведені оптимальні умови роботи з мінімальним напруженням праці.

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Визначення області працездатності абонентського пристрою телекомунікаційних мереж в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Розроблювальна антена і абонентський пристрій телекомунікаційних мереж може використовуватися як у побуті, так і різними організаціями у ВПК в різних частинах України, тому існує ймовірність впливу на пристрій іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу. Вплив іонізуючого випромінювання на електрорадіоелементи викликає зворотні та незворотні процеси, внаслідок яких може бути порушена робота елементів схеми, що призводить до виходу з ладу апаратури.

Надзвичайна ситуація є наслідком сукупності виняткових обставин, що склалися у відповідній зоні в результаті надзвичайної події техногенного, природного, антропогенного та воєнного характеру, а також під впливом можливих надзвичайних умов.

Надзвичайні ситуації, які можуть виникати на території України і здійснювати негативний вплив на функціонування об'єктів економіки обороноздатність, технічну розвідку та життєдіяльність населення.

Надзвичайні ситуації особливого періоду характеризуються впливом світлового імпульсу, радіаційного впливу та дії електромагнітного імпульсу.

При проходженні потоку гамма-опромінення через елементи РЕА, в них виникають вільні носії електричних зарядів, внаслідок переміщення яких виникає хибний імпульс, який може призвести до збою в роботі пристрою.

Особливо чутливими до радіації елементами є елементи з високим вмістом металів, яким в свою чергу властива висока концентрація вільних носіїв зарядів. Радіація в РЕА викликає зворотні і незворотні процеси, внаслідок яких можлива зміна майже всіх електричних та експлуатаційних характеристик, що залежать від проходження процесів іонізації, порушення структури матеріалів, що призводить до пошкодження апаратури.

Під час дії електромагнітного імпульсу (ЕМІ) у тілах, що проводять електричний струм на частку секунди (час дії ЕМІ) виникає імпульс електричного струму і з'являється різниця потенціалів відносно землі. Під дією цих напруг може відбутись пошкодження РЕА, ліній зв'язку, вихід з ладу запобіжників і т.д.

6.3.1 Визначення області працездатності абонентського пристрою телекомунікаційних мереж в умовах дії іонізуючого випромінювання

Визначаємо потужність експозиційної дози для кожного елемента і знаходимо елемент, який найбільш чуттєвий до дії іонізуючого випромінювання.

Таблиця 6.1 - Стійкість абонентського елементів пристрою до радіації

№	Блоки елементів	Елементи РЕА	Найменування	Ргр.і, р/год	Ргр, р/год
1	Основний пристрій	Конденсатори	К50-35, К10-17	10^5	10^4
		Резистори	С2-23	10^6	
		Транзистори	КТ3102А	10^5	
		Мікросхеми	FT232RL, АТ24С512	10^4	
2	Система керування	Діоди	АЛ307	10^5	10^5
		мікрозбірка	SBТ15	10^5	

Аналізуючи дані таблиці 1, визначаємо, що найбільшого впливу зазнають мікросхеми та діелектричні матеріали. В них незворотні дії виникають при рівні p_i , яка для пристрою в цілому є граничною, отже, $p_{гран}=10^4$ Р/год.

В якості критерію стійкості роботи РЕА використовують значення рівня радіації гамма-випромінювання, яке розраховується за формулою

$$p'_{гран} = p_{гран} \cdot K_H \cdot K_{посл} [P / год], \quad (6.1)$$

де $p_{гран}$ – межа стійкості роботи приладу, Рад/с;

K_H – коефіцієнт надійності елементної бази, $K_H = 0,9 \dots 0,95$,

приймаємо $K_H = 0,92$;

$K_{посл}$ – коефіцієнт послаблення радіації, із завдання: $K_{посл} = 4$.

Тоді

$$p'_{гран} = 10^4 \cdot 0,92 \cdot 4 = 3,68 \cdot 10^4 (P / год).$$

Визначимо допустимий час роботи РЕА в заданих умовах

$$t_{доп} = \frac{D_{зр} \cdot K_{посл} + 2P_1 \cdot \sqrt{t_n}}{2P_1} \quad (6.2)$$

$$t_{доп} = \frac{10^4 \cdot 4 + 2 \cdot 6,83 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 6,83} = 2929,26 \text{ (год)}$$

6.3.2 Визначення області працездатності абонентського пристрою телекомунікаційних мереж в умовах дії електромагнітного імпульсу

За критерій стійкості роботи абонентського пристрою в умовах дії електромагнітного імпульсу можна прийняти коефіцієнт безпеки, який визначається за формулою

$$K_B = 20 \cdot \lg \frac{U_\partial}{U_\Gamma} \geq 40 [\text{дБ}], \quad (6.3)$$

де U_Γ – напруга наведення за рахунок електромагнітного імпульсу горизонтальних струмопровідних частин плати, В;

U_∂ – допустиме коливання напруги живлення, В.

Визначаємо допустиме коливання напруги живлення

$$U_\partial = U_{ж} + \frac{U_{ж}}{100} \cdot \Delta \quad (6.4)$$

де $U_{ж}$ – напруга живлення приладу ($U_{ж} = 30\text{В}$);

N - допустиме коливання напруги живлення ($N = \pm 5\%$).

$$U_\partial = 30 + \frac{30}{100} \cdot 5 = 31,5 \quad (\text{В}).$$

Плата пристрою розташована в горизонтальній площині. Визначимо максимальну очікувану напругу в горизонтальних лініях з рівності

$$20 \cdot \lg \frac{U_\partial}{U_\Gamma} = 40 (\text{В}) \quad (6.5)$$

$$U_\Gamma = \frac{U_\partial}{100} [\text{В}], \quad (6.6)$$

$$U_\Gamma = \frac{31,5}{100} = 0,315 (\text{В}).$$

Вертикальна складова напруженості електричного поля визначається як

$$U_\Gamma = E_B \cdot l_\Gamma, \quad (6.7)$$

звідки

$$E_B = \frac{U_\Gamma}{l_\Gamma} [B / м], \quad (6.8)$$

де l_Γ – максимальна довжина горизонтального контуру електричної схеми, м ($l_\Gamma = 0,1$ м).

$$E_B = \frac{0,315}{0,1} = 3,15 (B / м).$$

Згідно з розрахунками абонентський пристрій здатний працювати в умовах дії електромагнітного імпульсу при напруженості вертикальної складової електричного поля $E_B \leq 3,15$ В / м.

На підставі виконаних розрахунків можна зробити висновок про те, що даний абонентський пристрій здатний стійко працювати в середині будівлі, яка має коефіцієнт послаблення радіації 4, в умовах дії іонізуючого випромінювання при потужності дози випромінювання до $3,68 \cdot 10^4$ Р/год.

Також в даному розділі було визначено область працездатності абонентського пристрою телекомунікаційних мереж в умовах дії загрозливих чинників НС та в умовах дії іонізуючого випромінювання. Визначено потужність експозиційної дози для кожного елементу, яка в цілому для пристрою є граничною і складає $p_{гран} = 3,68 \cdot 10^4$ Рад/с.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено огляд опублікованих у пресі розроблених гнучких друкованих антен мобільних телефонів і аналіз їх характеристик. У цих роботах відсутня загальна методика проектування антен стільникових телефонів з використання більш широкої сітки частот в одному апарату.

В основі передбачуваних в літературі антен лежать друковані антени, що володіють резонансними властивостями. Підбір параметрів конструкції забезпечує робочу частоту і смугу.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено огляд і аналіз гнучких друкованих антен мобільних телефонів, а також тенденції їх розвитку шляхом розширення використовуваних частот. Виявлено необхідність створення антен нового покоління стільникового зв'язку. Ці гнучкі друковані антени повинні одночасно працювати в декількох робочих діапазонах частот, і відрізняються істотно більш широкою смугою частот і бажано мають ослаблене опромінення абонента. Також слід наголосити на необхідності розробки гнучких друкованих антен з доповненням до існуючих робочим частотам більш високих робочих частот на 2 ГГц і вище.

У даному дослідженні автор розрахував параметри гнучкої антени. Для розрахунків автор використовував наступні вихідні дані: діапазон частот 890–915 МГц для зв'язку від терміналу до базової станції, та 935–960 МГц для зв'язку від базової станції до терміналу, характеристичний опір антени 50 Ом, пікова потужність випромінювання 23 дБм, $\varepsilon = 2,05$, $K_{CX} \leq 2,5$.

Згідно проведених економічних розрахунків рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Широкосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM» становить 36,0 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,27 рази. Також термін окупності становить 2,83 роки, що менше 3-х років. Це свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

У розділі охорони праці опрацьовано такі питання, як причини виникнення, дія на організм людини та нормування шкідливих та небезпечних виробничих факторів у виробничому приміщенні; карта умов праці (обґрунтування вибору нормованих значень шкідливих та небезпечних виробничих факторів, оцінка факторів виробничого і трудового процесів, гігієнічна оцінка умов праці, оцінка технічного і організаційного рівня, атестація робочого місця); рекомендації щодо поліпшення умов праці, а також розглянуто норми пожежної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. B. Mohamadzade, R. M. Hashmi, R.B.V.B. Simorangkir, R. Gharaei, S.Ur. Rehman, Q.H. Ab-basi. Recent Advances in Fabrication Methods for Flexible Antennas in Wearable Devices: State of the Art. *Sensors*, vol. 19, no. 10, 2312, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19102312>
2. S.G. Kirtania, A.W. Elger, Md.R. Hasan, A. Wisniewska, K. Sekhar, T. Karacolak, P.K. Sekhar. Flexible Antennas: A Review. *Micromachines*, vol. 11, no. 9, 847, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi11090847>
3. Буй Као Нинь. Малогабаритные диапазонные печатные антенны сотовых телефонов. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Специальность 05.12.07 - «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии». Москва, 2015. 107 с.
4. C.A. Balanis, *Antenna Theory. Analysis and Design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016. 1072 p.
5. Семенов А.О., Шутило М.А., Луцький Є.Ф., Зубарев О.В. Дослідження впливу поверхні землі на спрямовані властивості пасивних логоперіодичних антен цифрового телебачення стандартів DVB-T і DVB-T2. *Збірник тез доповідей II між-народної конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах»*, 29-31 жовтня 2013 року, Вінниця. Вінниця: ВНТУ, 2013. С. 206-208.
6. Рудик А.В., Дрючин О.О., Возняк О.М., Семенов А.О. Дослідження структури поля випромінювання багатомодових антен. Матеріали 7-ї МНПК «Наука і освіта '2004». Том 63. Технічні науки. Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. С.62-64.
7. Семенов А.О., Матковська К.О., Остапюк А.А. Застосування циліндричних спіральних антен в обладнанні радіотехнічних систем і систем зв'язку. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвячений Дню науки, м. Житомир, 15 – 17 травня 2013 року. Житомир : ЖДТУ, 2013. С. 173-174.

8. Семенов А.О., Шутило М.А., Луцький Є.Ф., Зубарєв О.В. Дослідження впливу поверхні землі на спрямовані властивості пасивних лого-періодичних антен цифрового телеба-чення стандартів DVB-T і DVB-T2. Збірник тез доповідей II між-народної конференції «Вимі-рювання, контроль та діагнос-тика в технічних системах», 29-31 жовтня 2013 року, Вінниця. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – С. 206-208.

9. Семенов А.О., Семенова О.О., Коваль К.О., Пастушенко О.Л. Гнучка LTE антена для носимих інфокомунікаційних пристроїв. 8-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПРН-2021). 03-05 листопада 2021, Вінниця, ВНТУ. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/spirn/spirn2021/paper/viewFile/13883/11756>

10. Семенов А.О., Іванов О.С., Шмата В.С. LTE широкосмугова антена для радіотехнологій доступу інфокомунікаційних пристроїв. 8-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПРН-2021). 03-05 листопада 2021, Вінниця, ВНТУ. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/spirn/spirn2021/paper/viewFile/13911/11780>

11. The Fourth Industrial Revolution. Available online: <https://www.verizon.com/about/our-company/fourthindustrial-revolution> (accessed on 22 July 2020).

12. What Will 5G Bring to Industrial Robotics. Available online: <https://www.ericsson.com/en/blog/2018/12/what-will-5g-bring-to-industrial-robotics> (accessed on 22 July 2020).

13. Hou, J.; Qu, L.; Shi, W. A survey on internet of things security from data perspectives. *Comput. Netw.* 2019, 148, 295–306.

14. Newman, P. The Internet of Things 2020: Here's What over 400 IoT Decision-Makers Say about the Future of Enterprise Connectivity and How IoT Companies Can Use it to Grow Revenue. Available online:

<https://www.businessinsider.com/internet-of-things-report> (accessed on 22 July 2020).

15. Wang, D.; Chen, D.; Song, B.; Guizani, N.; Yu, X.; Du, X. From IoT to 5G IIoT: The Next Generation IoT-Based Intelligent Algorithms and 5G Technologies. *IEEE Commun. Mag.* 2018, 56, 114–120. [CrossRef]

16. Zhan, Y.; Mei, Y.; Zheng, L. Materials capability and device performance in flexible electronics for the Internet of Things. *J. Mater. Chem. C* 2014, 2, 1220–1232.

17. Flexible Electronics & Circuit Market by Application, Circuit Structure|COVID-19 Impact Analysis|MarketsandMarketsTM. Available online: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/flexible-electronics-market-50634885.html> (accessed on 22 July 2020).

18. Liu, Y.; Wang, H.; Zhao, W.; Zhang, M.; Qin, H.; Xie, Y. Flexible, Stretchable Sensors for Wearable Health Monitoring: Sensing Mechanisms, Materials, Fabrication Strategies and Features. *Sensors* 2018, 18, 645.

19. Li, R.; Wang, L.; Yin, L. Materials and Devices for Biodegradable and Soft Biomedical Electronics. *Materials* 2018, 11, 2108.

20. Sethi, P.; Sarangi, S.R. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. *J. Electr. Comput. Eng.* 2017, 2017, 1–25.

21. Gao, W.; Zhu, Y.; Wang, Y.; Yuan, G.; Liu, J.-M. A review of flexible perovskite oxide ferroelectric films and their application. *J. Mater.* 2020, 6, 1–16.

22. Jilani, S.F.; Abbasi, Q.H.; Alomainy, A. Inkjet-Printed Millimetre-Wave PET-Based Flexible Antenna for 5G Wireless Applications. In Proceedings of the 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G), Dublin, Ireland, 30–31 August 2018; IEEE: Dublin, Ireland, 2018; pp. 1–3.

23. Huang, S.; Liu, Y.; Zhao, Y.; Ren, Z.; Guo, C.F. Flexible Electronics: Stretchable Electrodes and Their Future. *Adv. Funct. Mater.* 2019, 29, 1805924.

24. Ghasemi, A.; Sousa, E.S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, challenges and design trade-offs. *IEEE Commun. Mag.* 2008, 46, 32–39.

25. Singh, R.; Singh, E.; Nalwa, H.S. Inkjet-printed nanomaterial based flexible radio frequency identification (RFID) tag sensors for the internet of nano things. *RSC Adv.* 2017, 7, 48597–48630.
26. Abhinav K, V.; Rao R, V.K.; Karthik, P.S.; Singh, S.P. Copper conductive inks: Synthesis and utilization in flexible electronics. *RSC Adv.* 2015, 5, 63985–64030.
27. Corchia, L.; Monti, G.; Tarricone, L. Wearable Antennas: Nontextile versus Fully Textile Solutions. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2019, 61, 71–83.
28. Masihi, S.; Panahi, M.; Maddipatla, D.; Bose, A.K.; Zhang, X.; Hanson, A.J.; Narakathu, B.B.; Bazuin, B.J.; Atashbar, M.Z. Development of a Flexible Tunable and Compact Microstrip Antenna via Laser Assisted Patterning of Copper Film. *IEEE Sens. J.* 2020, 20, 7579–7587.
29. Arif, A.; Zubair, M.; Ali, M.; Khan, M.U.; Mehmood, M.Q. A Compact, Low-Profile Fractal Antenna for Wearable On-Body WBAN Applications. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2019, 18, 981–985.
30. Rmili, H.; Miane, J.-L.; Zangar, H.; Olinga, T. Design of microstrip-fed proximity-coupled conducting-polymer patch antenna. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2006, 48, 655–660.
31. Kaufmann, T.; Verma, A.; Al-Sarawi, S.F.; Truong, V.-T.; Fumeaux, C. Comparison of two planar elliptical ultra-wideband PPy conductive polymer antennas. In *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Chicago, IL, USA, 8–14 July 2012*; IEEE: Chicago, IL, USA, 2012; pp. 1–2.
32. Tseghai, G.B.; Mengistie, D.A.; Malengier, B.; Fante, K.A.; Van Langenhove, L. PEDOT:PSS-Based Conductive Textiles and Their Applications. *Sensors* 2020, 20, 1881.
33. Wojkiewicz, J.-L.; Alexander, P.; Bergheul, S.; Belkacem, B.; Lasri, T.; Zahir, H.; Kone, L. Design fabrication and characterisation of polyaniline and multiwall carbon nanotubes composites-based patch antenna. *IET Microw. Antennas Propag.* 2016, 10, 88–93.

34. Shin, K.-Y.; Cho, S.; Jang, J. Graphene/Polyaniline/Poly(4-styrenesulfonate) Hybrid Film with Uniform Surface Resistance and Its Flexible Dipole Tag Antenna Application. *Small* 2013, 9, 3792–3798.
35. Lee, J.S.; Kim, M.; Oh, J.; Kim, J.; Cho, S.; Jun, J.; Jang, J. Platinum-decorated carbon nanoparticle/polyaniline hybrid paste for flexible wideband dipole tag-antenna application. *J. Mater. Chem. A* 2015, 3, 7029–7035.
36. Mo, L.; Guo, Z.; Wang, Z.; Yang, L.; Fang, Y.; Xin, Z.; Li, X.; Chen, Y.; Cao, M.; Zhang, Q.; et al. Nano-Silver Ink of High Conductivity and Low Sintering Temperature for Paper Electronics. *Nanoscale Res. Lett.* 2019, 14, 197.
37. Ankireddy, K.; Druel, T.; Vunnam, S.; Filipič, G.; Dharmadasa, R.; Amos, D.A. Seed mediated copper nanoparticle synthesis for fabricating oxidation free interdigitated electrodes using intense pulse light sintering for flexible printed chemical sensors. *J. Mater. Chem. C* 2017, 5, 11128–11137.
38. Guerchouche, K.; Herth, E.; Calvet, L.E.; Roland, N.; Loyez, C. Conductive polymer based antenna for wireless green sensors applications. *Microelectron. Eng.* 2017, 182, 46–52.
39. Zare, Y.; Rhee, K.Y. Calculation of the Electrical Conductivity of Polymer Nanocomposites Assuming the Interphase Layer Surrounding Carbon Nanotubes. *Polymers* 2020, 12, 404.
40. Hamouda, Z.; Wojkiewicz, J.-L.; Pud, A.A.; Kone, L.; Bergheul, S.; Lasri, T. Magnetodielectric Nanocomposite Polymer-Based Dual-Band Flexible Antenna for-Wearable Applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018, 66, 3271–3277.
41. Ravindran, A.; Feng, C.; Huang, S.; Wang, Y.; Zhao, Z.; Yang, J. Effects of Graphene Nanoplatelet Size and Surface Area on the AC Electrical Conductivity and Dielectric Constant of Epoxy Nanocomposites. *Polymers* 2018, 10, 477.
42. Elmobarak Elobaid, H.A.; Abdul Rahim, S.K.; Himdi, M.; Castel, X.; Abedi-an Kasgari, M. A Transparent and Flexible Polymer-Fabric Tissue UWB Antenna for Future Wireless Networks. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, 16, 1333–1336.

43. Scidà, A.; Haque, S.; Treossi, E.; Robinson, A.; Smerzi, S.; Ravesi, S.; Borini, S.; Palermo, V. Application of graphene-based flexible antennas in consumer electronic devices. *Mater. Today* 2018, 21, 223–230.
44. Leng, T.; Huang, X.; Chang, K.; Chen, J.; Abdalla, M.A.; Hu, Z. Graphene Nanoflakes Printed Flexible Meandered-Line Dipole Antenna on Paper Substrate for Low-Cost RFID and Sensing Applications. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2016, 15, 1565–1568.
45. Zhou, X.; Leng, T.; Pan, K.; Abdalla, M.A.; Hu, Z. Graphene Printed Flexible and Conformal Array Antenna on Paper Substrate for 5.8 GHz Wireless Communications. In *Proceedings of the 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020*; IEEE: Copenhagen, Denmark, 2020; pp. 1–4.
46. Shin, K.-Y.; Hong, J.-Y.; Jang, J. Micropatterning of Graphene Sheets by Inkjet Printing and Its Wideband Dipole-Antenna Application. *Adv. Mater.* 2011, 23, 2113–2118.
47. Kopyt, P.; Salski, B.; Olszewska-Placha, M.; Janczak, D.; Sloma, M.; Kurkus, T.; Jakubowska, M.; Gwarek, W. Graphene-Based Dipole Antenna for a UHF RFID Tag. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2016, 64, 2862–2868.
48. Dang, W.; Vinciguerra, V.; Lorenzelli, L.; Dahiya, R. Printable stretchable interconnects. *Flex. Print. Electron.* 2017, 2, 013003.
49. Song, L.; Myers, A.C.; Adams, J.J.; Zhu, Y. Stretchable and Reversibly Deformable Radio Frequency Antennas Based on Silver Nanowires. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2014, 6, 4248–4253.
50. Kumar, A.; Saghlatoon, H.; La, T.-G.; Mahdi Honari, M.; Charaya, H.; Abu Damis, H.; Mirzavand, R.; Mousavi, P.; Chung, H.-J. A highly deformable conducting traces for printed antennas and interconnects: Silver/fluoropolymer composite amalgamated by triethanolamine. *Flex. Print. Electron.* 2017, 2, 045001.
51. Guo, X.; Huang, Y.; Wu, C.; Mao, L.; Wang, Y.; Xie, Z.; Liu, C.; Zhang, Y. Flexible and reversibly deformable radio-frequency antenna based on stretchable SWCNTs/PANI/Lycra conductive fabric. *Smart Mater. Struct.* 2017, 26, 105036.

52. So, J.-H.; Thelen, J.; Qusba, A.; Hayes, G.J.; Lazzi, G.; Dickey, M.D. Reversibly Deformable and Mechanically Tunable Fluidic Antennas. *Adv. Funct. Mater.* 2009, 19, 3632–3637.
53. Park, M.; Im, J.; Shin, M.; Min, Y.; Park, J.; Cho, H.; Park, S.; Shim, M.-B.; Jeon, S.; Chung, D.-Y.; et al. Highly stretchable electric circuits from a composite material of silver nanoparticles and elastomeric fibres. *Nat. Nanotech.* 2012, 7, 803–809.
54. Sebastian, M.T.; Jantunen, H.; Uvic, R. (Eds.) *Microwave Materials and Applications*; John Wiley & Sons: Chichester, UK; Hoboken, NJ, USA, 2017; ISBN 978-1-119-20852-5.
55. Wong, W.S.; Salleo, A. (Eds.) *Flexible Electronics: Materials and Applications*; *Electronic Materials: Science & Technology*; Springer: New York, NY, USA, 2009; ISBN 978-0-387-74362-2.
56. Khan, S.; Lorenzelli, L.; Dahiya, R.S. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sens. J.* 2015, 15, 3164–3185.
57. MacDonald, W.A.; Looney, M.K.; MacKerron, D.; Eveson, R.; Adam, R.; Hashimoto, K.; Rakos, K. Latest advances in substrates for flexible electronics. *J. Soc. Inf. Disp.* 2007, 15, 1075.
58. Subbaraman, H.; Pham, D.T.; Xu, X.; Chen, M.Y.; Hosseini, A.; Lu, X.; Chen, R.T. Inkjet-Printed Two-Dimensional Phased-Array Antenna on a Flexible Substrate. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2013, 12, 170–173.
59. Sanusi, O.M.; Ghaar, F.A.; Shamim, A.; Vaseem, M.; Wang, Y.; Roy, L. Development of a 2.45 GHz Antenna for Flexible Compact Radiation Dosimeter Tags. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019, 67, 5063–5072.
60. Wagih, M.; Wei, Y.; Beeby, S. Flexible 2.4 GHz Node for Body Area Networks With a Compact High-Gain Planar Antenna. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2019, 18, 49–53.
61. Park, J.; Park, S.; Yang, W.; Kam, D.G. Folded aperture coupled patch antenna fabricated on FPC with vertically polarised end-fire radiation for fifth-generation

millimetre-wave massive MIMO systems. *IET Microw. Antennas Propag.* 2019, 13, 1660–1663.

62. Thielens, A.; Deckman, I.; Aminzadeh, R.; Arias, A.C.; Rabaey, J.M. Fabrication and Characterization of Flexible Spray-Coated Antennas. *IEEE Access* 2018, 6, 62050–62061.

63. Li, W.; Hei, Y.; Grubb, P.M.; Shi, X.; Chen, R.T. Compact Inkjet-Printed Flexible MIMO Antenna for UWB Applications. *IEEE Access* 2018, 6, 50290–50298.

64. Li, W.T.; Hei, Y.Q.; Grubb, P.M.; Shi, X.-W.; Chen, R.T. Inkjet Printing of Wideband Stacked Microstrip Patch Array Antenna on Ultrathin Flexible Substrates. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 2018, 8, 1695–1701.

65. Das, S.; Mitra, D. A Compact Wideband Flexible Implantable Slot Antenna Design with Enhanced Gain. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018, 66, 4309–4314.

66. Rizwan, M.; Adhur Kuttty, A.; Kgwadi, M.; Drysdale, T.D.; Sydanheimo, L.; Ukkonen, L.; Virkki, J. Possibilities of Fabricating Copper-based RFID Tags with Photonic-sintered Inkjet Printing and Thermal Transfer Printing. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, 16, 1828–1831.

67. Saeed, S.M.; Balanis, C.A.; Birtcher, C.R. Inkjet-Printed Flexible Reconfigurable Antenna for Conformal WLAN/WiMAX Wireless Devices. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2016, 15, 1979–1982.

68. Saraswat, K.; Harish, A.R. Flexible dual-band dual-polarised CPW-fed monopole antenna with discrete-frequency reconfigurability. *IET Microw. Antennas Propag.* 2019, 13, 2053–2060.

69. Castro, A.T.; Sharma, S.K. Inkjet-Printed Wideband Circularly Polarized Microstrip Patch Array Antenna on a PET Film Flexible Substrate Material. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2018, 17, 176–179.

70. Amendola, S.; Palombi, A.; Marrocco, G. Inkjet Printing of Epidermal RFID Antennas by Self-Sintering Conductive Ink. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2018, 66, 1561–1569.

71. Riheen, M.A.; Nguyen, T.T.; Saha, T.K.; Karacolak, T.; Sekhar, P.K. CPW fed Wideband Bowtie Slot Antenna on PET substrate. *Prog. Electromagn. Res. C* 2020, 101, 147–158.
72. Rahman, M.A.; Hossain, M.F.; Riheen, M.A.; Sekhar, P.K. Early Brain Stroke Detection using Flexible Monopole Antenna. *Prog. Electromagn. Res. C* 2020, 99, 99–110.
73. Li, Z.; Sinha, S.K.; Treich, G.M.; Wang, Y.; Yang, Q.; Deshmukh, A.A.; Sotzing, G.A.; Cao, Y. All-organic flexible fabric antenna for wearable electronics. *J. Mater. Chem. C* 2020, 8, 5662–5667.
74. Bisognin, A.; Thielleux, J.; Wei, W.; Titz, D.; Ferrero, F.; Brachat, P.; Jacquemod, G.; Happy, H.; Luxey, C. Inkjet Coplanar Square Monopole on Flexible Substrate for 60-GHz Applications. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2014, 13, 435–438.
75. Khaleel, H.R. (Ed.) *Innovation in Wearable and Flexible Antennas*; Wit Press: Southampton, UK; Billerica, MA, USA, 2015.
76. Johnston, I.D.; McCluskey, D.K.; Tan, C.K.L.; Tracey, M.C. Mechanical characterization of bulk Sylgard for microfluidics and microengineering. *J. Micro-mech. Microeng.* 2014, 24, 035017. [CrossRef]
77. Yijun, Z.; Bayram, Y.; Feng, D.; Liming, D.; Volakis, J.L. Polymer-Carbon Nanotube Sheets for Conformal Load Bearing Antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2010, 58, 2169–2175.
78. Trajkovikj, J.; Zurcher, J.-F.; Skrivervik, A.K. PDMS, A Robust Casing for Flexible W-BAN Antennas [EurAAP Corner]. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2013, 55, 287–297.
79. Huang, G.-W.; Xiao, H.-M.; Fu, S.-Y. Wearable Electronics of Silver-Nanowire/Poly(dimethylsiloxane) Nanocomposite for Smart Clothing. *Sci. Rep.* 2015, 5, 13971.
80. Hayes, G.J.; Ju-Hee, S.; Qusba, A.; Dickey, M.D.; Lazzi, G. Flexible Liquid Metal Alloy (EGaIn) Microstrip Patch Antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2012, 60, 2151–2156.

81. Pacchini, S.; Cometto, M.; Chok, J.J.; Dufour, G.; Tiercelin, N.; Pernod, P.; Kang, T.B.; Coquet, P. Inkjet-printing of hybrid Ag/conductive polymer towards stretchable microwave devices. In Proceedings of the 2015 European Microwave Conference (EuMC), Paris, France, 7–10 September 2015; IEEE: Paris, France, 2015; pp. 865–868.
82. Tao, Y.; Tao, Y.; Wang, L.; Wang, B.; Yang, Z.; Tai, Y. High-reproducibility, flexible conductive patterns fabricated with silver nanowire by drop or fit-to-flow method. *Nanoscale Res. Lett.* 2013, 8, 147.
83. Bodö, P.; Sundgren, J.-E. Titanium deposition onto ion-bombarded and plasma-treated polydimethylsiloxane: Surface modification, interface and adhesion. *Thin Solid Films* 1986, 136, 147–159.
84. Saha, T.K.; Knaus, T.N.; Khosla, A.; Sekhar, P.K. A CPW-fed flexible UWB antenna for IoT applications. *Microsyst. Technol.* 2018.
85. Hertleer, C.; Rogier, H.; Vallozzi, L.; Van Langenhove, L. A Textile Antenna for O-Body Communication Integrated Into Protective Clothing for Firefighters. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2009, 57, 919–925.
86. Salonen, P.; Rahmat-Samii, Y.; Scharath, M.; Kivikoski, M. Effect of textile materials on wearable antenna performance: A case study of GPS antennas. In Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, Monterey, CA, USA, 20–25 June 2004; IEEE: Monterey, CA, USA, 2004; Volume 1, pp. 459–462.
87. Locher, I.; Klemm, M.; Kirstein, T.; Troster, G. Design and Characterization of Purely Textile Patch Antennas. *IEEE Trans. Adv. Packag.* 2006, 29, 777–788.
88. Zhu, S.; Langley, R. Dual-Band Wearable Textile Antenna on an EBG Substrate. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2009, 57, 926–935.
89. Scarpello, M.L.; Kazani, I.; Hertleer, C.; Rogier, H.; Vande Ginste, D. Stability and Efficiency of Screen-Printed Wearable and Washable Antennas. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2012, 11, 838–841.
90. Ullah, M.; Islam, M.; Alam, T.; Ashraf, F. Paper-Based Flexible Antenna for Wearable Telemedicine Applications at 2.4 GHz ISM Band. *Sensors* 2018, 18, 4214.

91. DeJean, G.; Bairavasubramanian, R.; Thompson, D.; Ponchak, G.E.; Tentzeris, M.M.; Papapolymerou, J.
92. Liquid Crystal polymer (LCP): A new organic material for the development of multilayer dual-frequency/dual-polarization flexible antenna arrays. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2005, 4, 22–26.
93. Jilani, S.F.; Munoz, M.O.; Abbasi, Q.H.; Alomainy, A. Millimeter-Wave Liquid Crystal Polymer Based
94. Conformal Antenna Array for 5G Applications. *Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2019, 18, 84–88.
95. Venkateswara Rao, M.; Madhav, B.T.P.; Anilkumar, T.; Prudhvinadh, B. Circularly polarized flexible antenna
96. on liquid crystal polymer substrate material with metamaterial loading. *Micro. Opt. Technol. Lett.* 2020, 62, 866–874.
97. Khaleel, H.R.; Al-Rizzo, H.M.; Abbosh, A.I. Design, Fabrication, and Testing of Flexible Antennas.
98. In *Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications*; Kishk, A., Ed.; InTech: London, UK, 2013; ISBN 978-953-51-1019-4.
99. Mohamadzade, B.; Hashmi, R.M.; Simorangkir, R.B.V.B.; Gharaei, R.; Ur Rehman, S.; Abbasi, Q.H. Recent
100. *Advances in Fabrication Methods for Flexible Antennas in Wearable Devices: State of the Art.* *Sensors* 2019, 19, 2312.
101. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
102. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.
103. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

104.Правила улаштування електроустановок [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

105.ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

106.ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення [Електронний ресурс] Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

107.ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

108.Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14_nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html

Додаток А
(обов'язковий)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри РТ ВНТУ,
д.т.н., професор
_____ О.В. Осадчук
“ ___ ” _____ 2021 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

«Широкосмугова друкована антена з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM»

08-36.МКР.004.00.000 ТЗ

Керівник роботи:
_____ к. т. н., ст. викл. Притула М. О.
“ ___ ” _____ 2021 р.

Розробив студент гр. РТ-20м
_____ Шмата В. С.
“ ___ ” _____ 2021 р.

1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № 277 “ 24 ” 09 2021 року та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: “02” вересня 2021 р.

Дата закінчення: “20” грудня 2021 р.

2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою роботи є розробка та дослідження широкосмугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM.

Задачами досліджень магістерської кваліфікаційної роботи є:

- провести аналіз сучасного стану розробки широкосмугових друкованих антен з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM;
- провести літературний огляд теоретичних основ побудови широкосмугових друкованих антен;
- розробити варіанти широкосмугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM;
- здійснити дослідження спрямованих властивостей та частотних характеристик широкосмугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM;
- дослідити вплив виду та форми широкосмугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM на її імпедансні характеристики.

3. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

1. Панченко Б.А., Нефедов Е.И. Микрополосковые антенны. Радио и связь. 1986.
2. Вишнеvский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G, Москва, Техносфера. 2009.

3. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 1. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 196 с.
4. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 2 / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 184 с.
5. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
6. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
7. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

4. ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки,
студент групи РТ-20м Шмата В.С.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується реалізувати .

5.1 Електричні параметри:

- GSM-900 (890-915 МГц і 935-960 МГц), GSM-1800 (1710-1785 МГц і 1805-1880 МГц);
- Максимальна пікова потужність – 23 дБм
- Коефіцієнт корисної дії антени – не менше 50%
- Коефіцієнт підсилення антени – не більше 3
- ширина діаграми спрямованості – не менше 230°

5.2 Кліматичні умови:

5.2.1 Атмосферний тиск на висоті до 2500 м над рівнем

моря, не вище, кПа 75.

5.2.2 Температура навколишнього середовища, °С -10..+50.

5.2.3 Відносна вологість повітря при 20°С, % 80.

5.3 Експлуатаційні параметри:

5.3.1 Використовувати за призначенням;

5.3.2 Час напрацювання на відмову, не менше ,год 100 тис.

5.3.3 Час неперервної роботи, не більше, год/добу 24.

6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		Початок	Закінчення		
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження МКР.	03.09.2021	14.09.2021	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів.	15.09.2021	21.09.2021	Аналіз літературних джерел. Підготовлений матеріал основних розділів.	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання.	21.09.2021	25.09.2021	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження теми. Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми.	26.09.2021	09.10.2021	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ. Розділ 1-2. Звіт по переддипломній практиці.
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	10.10.2021	03.11.2021	Проведені розрахунки та дослідження.	Розділ 3-4.
6.	Розділ моделювання	04.11.2021	12.11.2021	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	13.11.2021	18.11.2021	Структурні та електричні схеми	Графічна частина
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	19.11.2021	24.11.2021	Економічна частина	Розділ 5
9.	Охорона праці (ОП)	25.11.2021	30.11.2021	Частина БЖД	Розділ 6
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.12.2021	08.12.2021	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11.	Нормконтроль	09.12.2021	12.12.2021	Підпис нормконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання рецензування МКР	13.12.2021	19.12.2021	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13.	Захист МКР ЕК	21.12.2021	23.12.2021	Позитивний захист	Протокол ЕК

7. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи буде зроблено:

- Розроблено конструкцію широкосмугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM.
- Розроблено математичну модель широкосмугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM.
- Результати комп'ютерного моделювання широкосмугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM.
- Проведено результати дослідження широкосмугової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM.

Очікуваний економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень та розробки очікується покращення характеристик розроблюваного пристрою.

8. МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9. ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10. ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання роботи повинна містити:

- креслення конструкції широкопasmової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM;
- математичну модель широкопasmової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM;
- результати комп'ютерного моделювання широкопasmової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM;
- результати експериментальних досліджень широкопasmової друкованої антени з підвищеним коефіцієнтом корисної дії для абонентських пристроїв телекомунікаційних мереж стандарту GSM;
- дослідження питань охорони праці.

11. ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б
(обов'язковий)

ШИРОКОСМУГОВА ДРУКОВАНА АНТЕНА З ПІДВИЩЕНИМ
КОЕФІЦІЄНТОМ КОРИСНОЇ ДІЇ ДЛЯ АБОНЕНТСЬКИХ ПРИСТРОЇВ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ GSM

Додаток В
(обов'язковий)

ШИРОКОСМУГОВА ДРУКОВАНА АНТЕНА З ПІДВИЩЕНИМ
КОЕФІЦІЄНТОМ КОРИСНОЇ ДІЇ ДЛЯ АБОНЕНТСЬКИХ ПРИСТРОЇВ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ GSM

Додаток Д
(обов'язковий)

ШИРОКОСМУГОВА ДРУКОВАНА АНТЕНА З ПІДВИЩЕНИМ
КОЕФІЦІЄНТОМ КОРИСНОЇ ДІЇ ДЛЯ АБОНЕНТСЬКИХ ПРИСТРОЇВ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ GSM

Додаток Е
(обов'язковий)

ШИРОКОСМУГОВА ДРУКОВАНА АНТЕНА З ПІДВИЩЕНИМ
КОЕФІЦІЄНТОМ КОРИСНОЇ ДІЇ ДЛЯ АБОНЕНТСЬКИХ ПРИСТРОЇВ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ GSM

Додаток Ж
(обов'язковий)

ШИРОКОСМУГОВА ДРУКОВАНА АНТЕНА З ПІДВИЩЕНИМ
КОЕФІЦІЄНТОМ КОРИСНОЇ ДІЇ ДЛЯ АБОНЕНТСЬКИХ ПРИСТРОЇВ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ GSM

Додаток И
(обов'язковий)

ШИРОКОСМУГОВА ДРУКОВАНА АНТЕНА З ПІДВИЩЕНИМ
КОЕФІЦІЄНТОМ КОРИСНОЇ ДІЇ ДЛЯ АБОНЕНТСЬКИХ ПРИСТРОЇВ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ GSM

Додаток К
(обов'язковий)

ШИРОКОСМУГОВА ДРУКОВАНА АНТЕНА З ПІДВИЩЕНИМ
КОЕФІЦІЄНТОМ КОРИСНОЇ ДІЇ ДЛЯ АБОНЕНТСЬКИХ ПРИСТРОЇВ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ GSM

Додаток Л
(обов'язковий)

ШИРОКОСМУГОВА ДРУКОВАНА АНТЕНА З ПІДВИЩЕНИМ
КОЕФІЦІЄНТОМ КОРИСНОЇ ДІЇ ДЛЯ АБОНЕНТСЬКИХ ПРИСТРОЇВ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ GSM

