

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:

**«Гнучка широкосмугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж»**

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

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Іванов О.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор каф. РТ

Семенов А.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**

Іванову Олександрю Сергійовичу  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Гнучка широкосмугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж

керівник роботи д.т.н., проф., професор 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: Частотні діапазони В3 1800 МГц (DCS, Uplink 1710 - 1785 МГц, Downlink 1805 - 1880 МГц) та В20 800 МГц (Digital Dividend, Uplink 832 - 862 МГц, Downlink 791 - 821 МГц); Максимальна пікова потужність – 23 дБм; Коефіцієнт корисної дії антени – не менше 45%; Коефіцієнт підсилення антени – 1; ширина діаграми спрямованості – не менше 270°.

4. Зміст текстової частини: Огляд сучасних досягнень у методах виготовлення LTE гнучких широкосмугових антен носимих пристроїв; економічна частина; сучасний стан теорії та практики гнучких широкосмугових антен; розроблення гнучкої широкосмугової антени; експериментальні дослідження гнучкої широкосмугової друкованої антени; охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях; висновки; перелік посилань; додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Комп'ютерне проектування гнучкої антени; Результати моделювання спрямованих властивостей антени у головних плорщинах; Результати моделювання спрямованих властивостей антени у просторі; Ескізне креслення гнучкої антени; Результат моделювання частотної характеристики КСХ антени; Фото експериментального зразка та вимірювального обладнання; Результати експериментальних досліджень гнучкої широкосмугової антени.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор Семенов А.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)

Іванов О.С.

Керівник роботи

(підпис)

Семенов А.О.

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Іванов О.С. Гнучка широкосмугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма - радіотехніка. Вінниця: ВНТУ, 2021. 157 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 123 назв; рис.: 29; табл. 23.

У магістерській кваліфікаційній роботі розроблено Гнучка широкосмугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж. Вона дозволяє покращити радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж і спростити їх конструктивне виконання. Антена буде виконана всередині гнучкого браслету носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено аналіз сучасного стану гнучких друкованих антен. Наведено елементи теорії друкованих антен. Проведено розрахунок електричних і параметрів гнучкої широкосмугової 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

Ivanov O.S. Flexible broadband antenna for radio access technologies of LTE devices of infocommunication networks. Master's qualification work in specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - radio engineering. Vinnytsia: VNTU, 2021. 157 p.

In Ukrainian language. Refs.: 123 titles; Figs.: 29. Tables: 23.

In the master's qualification work, a flexible broadband antenna for radio access technologies of wearable devices LTE infocommunication networks was developed. It allows to improve radio technologies of access of wearable devices of LTE infocommunication networks and to simplify their design. The antenna will be made inside a flexible bracelet of LTE wearable devices of infocommunication networks.

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

<b>ВСТУП</b> .....	8
<b>1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДОСЯГНЕНЬ У МЕТОДАХ ВИГОТОВЛЕННЯ LTE ГНУЧКИХ ШИРОКОСМУГОВИХ АНТЕН НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ</b> .....	11
1.1. Аналіз радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфо- комунікаційних мереж.....	11
1.2. Гнучкі широкосмугові антени на тканинній основі із шиттям .....	15
1.3 Полімерні вбудовані антени.....	21
1.4 Мікрорідинні антени з інжекційними металами.....	26
1.5 Струменевий друк, трафаретний друк та фотолітографія .....	30
1.6 3D-друковані антени .....	34
1.7 Методи виготовлення гнучких носимих антен міліметрового діапазону .....	35
1.8 Фантоми, еквівалентні тканинам людини .....	39
1.9 Перспективні напрямки подальших досліджень .....	41
<b>2 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ГНУЧКИХ ШИРОКОСМУГОВИХ АНТЕН</b> .....	44
2.1 Сучасний стан теорії та практики гнучких широкосмугових антен для радіотехнологій доступу пристроїв мобільного зв'язку .....	44
2.2 Параметри та характеристики передавальних гнучких антен.....	46
2.3 Параметри та характеристики приймальних гнучких антен .....	50
2.4 Елементи гнучких широкодіапазонних антен.....	53
<b>3 РОЗРОБЛЕННЯ ГНУЧКОЇ ШИРОКОСМУГОВОЇ АНТЕНИ</b> .....	56
3.1 Електричний розрахунок гнучкої вкороченої симетричної вібраторної антени .....	56
3.2 Синтез параметрів гнучкої широкосмугової антени для нижнього діапазону робочої смуги частот.....	62

3.3 Комп'ютерне проектування гнучкої широкосмугової друкованої антени .....	67
3.4 Комп'ютерне моделювання спрямованих властивостей гнучкої широкосмугової друкованої антени .....	72
<b>4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГНУЧКОЇ ШИРОКОСМУГОВОЇ ДРУКОВАНОЇ АНТЕНИ</b> .....	74
<b>5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	78
5.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки .....	78
5.2 Оцінювання рівня новизни розробки .....	82
5.3 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки .....	86
5.4 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	88
5.5 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором .....	99
5.6 Висновки до розділу .....	103
<b>6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b> .....	105
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	109
6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи інфокомунікаційної мережі в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій .....	114
6.4 Висновки до розділу .....	119
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	120
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	122
Додаток А (обов'язковий). Технічне завдання .....	135
Додаток Б (обов'язковий). Комп'ютерне проектування гнучкої широкосмугової друкованої антени у програмі HFSS ANSYS.....	142
Додаток В (обов'язковий). Результати моделювання спрямованих властивостей гнучкої широкосмугової друкованої антени у головних площинах.....	144

Додаток Д (обов'язковий). Результати моделювання спрямованих властивостей гнучкої ширококугової друкованої антени у просторі .....	146
Додаток Е (обов'язковий). Ескізні креслення гнучкої ширококугової друкованої антени .....	148
Додаток Ж (обов'язковий). Результат моделювання частотної характеристики КСХ гнучкої ширококугової друкованої антени.....	150
Додаток И (обов'язковий). Фото експериментального зразка антени та вимірювального обладнання .....	152
Додаток К (обов'язковий). Результати експериментальних досліджень КСХ ширококугової гнучкої антени.....	154
Додаток Л (обов'язковий). Результати експериментальних досліджень гнучкої ширококугової друкованої антени з використанням векторного аналізатора .....	156



## ВСТУП

### *Актуальність теми.*

Протягом останнього десятиліття різко зросла популярність систем мобільного зв'язку. Відповідно до ринкових вимог, вона продовжує зростати. Найважливішу роль в більшій частині систем мобільного зв'язку грає антена, яка є одним з найбільш складних об'єктів проектування в сучасних мобільних пристроях зв'язку. Оскільки параметри антен систем мобільного зв'язку залежать від частоти, вони проектуються таким чином, щоб працювати в певних смугах. Перспективним напрямком є розробка широкосмугових і багатодіапазонних антенних систем. При цьому найважливішими характеристиками залишаються як і раніше загальнотехнічні характеристики і вартісні. Область застосування антен систем мобільного зв'язку також визначає цілий ряд вимог до параметрів і характеристик антен [1,2].

Швидке зростання систем мобільного зв'язку стимулює розробку, виготовлення і застосування нових типів антен для базових і мобільних станцій (мобільного телефону, ноутбука, персонального цифрового помічника (Personal Digital Assistants - PDA), і т.д ..). Раніше мобільні системи проектувалися для роботи в одному частотному діапазоні стандарту 2G систем мобільного зв'язку. Пізніше з'явилися й інші системи, такі як Цифровий стільниковий система (Digital Cellular System - DCS), Служба персонального зв'язку (Personal Communications Service - PCS) і Глобальна система мобільного зв'язку (Global System for Mobile Communications - GSM) [3,4].

### *Аналіз останніх досліджень.*

В даний час багато систем мобільного зв'язку використовують кілька частотних діапазонів, наприклад GSM 900/1800/1900 смуги (890-960 МГц і 1710-1990 МГц); Універсальна система мобільного зв'язку (Universal Mobile Telecommunication Systems - UMTS) смуги (1885-2200 МГц); Доступ (Wireless Fidelity - Wi-Fi) / Бездротова локальна мережа (Wireless Local Area Networks - WLAN) смуги (2400-2484 МГц і 5150-5825 МГц); Міжнародна взаємодія для

мікрохвильового доступу (Worldwide Interoperability for Microwave Access - WiMAX) смуг: 2.3 - 13.6 ГГц (частіше 2300 - 2500 МГц 2500 - 2690 МГц, 3300 - 3500 МГц і т.д.), був розроблений для організації єдиних бездротових мереж масштабу міста WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) [5,6].

В даний час широке застосування отримали LTE системи мобільного зв'язку нового покоління, що відрізняються широкосмугового уніфікованою системою радіодоступу, що дозволяє передавати відео та мультимедійну інформацію. З розвитком систем стільникового зв'язку виникла необхідність модернізації існуючих антен стільникових телефонів. В даний час вибір стандарту стільникового зв'язку однозначно визначає і вибір класу моделі телефону. Однак, незважаючи на різноманіття моделей телефонів, представлених на світовому ринку, всі вони мають схожу конструкцію [7,8].

*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 інфокомунікаційних 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 двочастотної гнучкої широкосмугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв інфокомунікаційних мереж 4G стандарту LTE-m1/NB-IoT.

*Задачами досліджень* магістерської кваліфікаційної роботи є:

- провести аналіз сучасного стану розробки гнучких широкосмугових антен для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж.;
- провести літературний огляд теоретичних основ побудови гнучких широкосмугових антен;

- розробити варіанти двочастотної гнучкої ширококугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв інфокомунікаційних мереж 4G стандарту LTE-m1/NB-IoT для діапазонів В3 і В20;
- здійснити дослідження спрямованих властивостей та частотних характеристик двочастотної гнучкої ширококугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв інфокомунікаційних мереж 4G стандарту LTE-m1/NB-IoT для діапазонів В3 і В20;
- дослідити вплив виду та форми двочастотної гнучкої ширококугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв інфокомунікаційних мереж 4G стандарту LTE-m1/NB-IoT для діапазонів В3 і В20.

*Об'єктом дослідження є процеси прямого та зворотного перетворення енергії електромагнітних радіохвиль в електричний сигнал у гнучкій двочастотній РСВ антені.*

*Предметом дослідження є просторі та частотні параметри і характеристики двочастотної гнучкої ширококугової РСВ антени.*

*Наукова новизна одержаних результатів – отримав подальший розвиток метод побудови гнучких ширококугових РСВ антен.*

*Практична новизна одержаних результатів – полягає в отриманих нових конструкцій і результатів експериментальних і модельних досліджень гнучких ширококугових РСВ антен.*

*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) [9].

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) [9].

## **1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ ДОСЯГНЕНЬ У МЕТОДАХ ВИГОТОВЛЕННЯ LTE ГНУЧКИХ ШИРОКОСМУГОВИХ АНТЕН НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ**

Антени є життєво важливим компонентом пристроїв бездротової мережі датчиків тіла. Носить антена в цій системі може використовуватися як компонент зв'язку або збирач енергії. У цій статті наведено детальний огляд останніх досягнень у методах виготовлення гнучких антен. Такі антени для будь-яких застосувань у мережах бездротових датчиків тіла мають особливості, такі як гнучкість, пристосованість, надійність та простота інтеграції, на відміну від звичайних антен. В останні роки були продемонстровані цікаві підходи до створення антен, вишитих на тканинах, інкапсульованих у полімерні композиції, надрукованих за допомогою струйного друку на гнучких ламінатах та тривимірному принтері та, що цікавіше, шляхом впорскування рідкого металу в мікроканали. У цій статті представлена експлуатаційна перспектива таких передових підходів та інших, а також аналізуються сильні та слабкі сторони кожного з них у мікрохвильовому та міліметровому діапазонах хвиль. Згідно останніх подій у кожній області розглядаються механічні та електричні основні параметри, і нарешті представлені деякі відкриті проблеми для майбутніх напрямків досліджень [10].

### **1.1. Аналіз радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж**

Останні досягнення в галузі бездротових технологій призвели до появи бездротових мереж для тіла (WBAN) завдяки їх широкому спектру додатків у медичних та немедичних областях. Це викликало широкий інтерес до області переносних антен як центральної точки будь-якої сенсорної системи WBAN. Для дослідження та комерціалізації систем зв'язку WBAN було визначено декілька частотних діапазонів, які останнім часом включають діапазони міліметрових хвиль (ммВт) (див. таблицю 1.1) [10].

Таблиця 1.1 – Смуги частот для BAN застосування [10]

Частота	Застосування
401–402 MHz	Комунікаційний сервіс медичних імплантів
402–405 MHz	
403.5–403.8 MHz	
405–406 MHz 413–457 MHz	Medradio Micropower Networks (MMN), передача та ретрансляція даних для імплантованих та носимих на тілі медичні пристрої для діагностичних та терапевтичних функцій Wi-Fi, розумні лікарняні ліжка, мобільні медпункти
2.4 & 5 GHz 2.404–2.478 GHz	Bluetooth, внутрішня навігація для пацієнтів, можливість підключення між пристроєм та смартфоном для моніторингу даних про стан здоров'я
2.36–2.4 GHz	Нова медична BAN (MBAN)
New Medical BAN (MBAN)	Промислове, наукове та медичне (ISM)
3.1–10.76 GHz	Надширокосмуговий (UWB)
57–64 GHz 59–66 GHz	Плани та правила групи на mmW-60 WBAN

Загальні сценарії застосування в WBAN, як показано на рисунку 1.1, включають [10]:

- Міжвузловий зв'язок між різними сенсорними вузлами, прикріпленими на поверхні тіла
- Внутрішньовузловий зв'язок між головним вузлом на корпусі та трансивером поза корпусом
- Імплантовані сенсорні вузли, що спілкуються з вузлом на тілі (вузол на тілі, що діє як реле)

- Імплантований сенсорний вузол зв'язується безпосередньо з трансивером поза тілом.

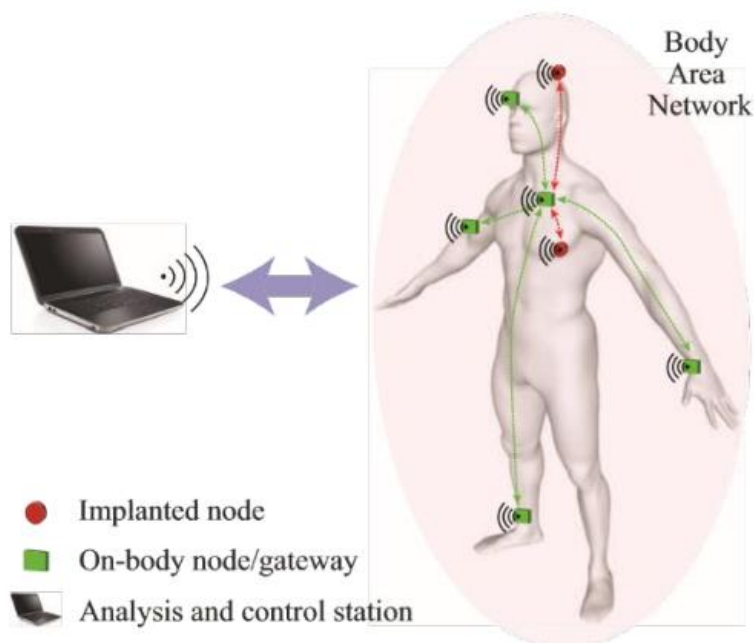


Рисунок 1.1 – Ілюстрація безпроводової мережі тіла людини [10]

Залежно від типу застосування життєво важливо вибрати відповідну форму для антени, оскільки універсальний підхід до конструкції часто не відповідає всім вимогам. Було запропоновано кілька форм антен, що носяться. Серед них плоскі монопольні антени [1], інтегровані перевернені F-антени (ІІФА) [2], планарні перевернені F-антени (PIFA) [3–5], мікросмужкові патч-антени [6], магнітоелектричні дипольні антени [7], інтегровані в підкладку хвилеводні (SIW) антени [8,9], антени на основі EBG [10], дипольні антени [11] та монопольні щілинні резонатори [12] на нижній частоті. Крім того, антени Ягі-Уда були запропоновані як відповідний варіант для зв'язку на тілі на міліметрових хвилях, маючи хороший компроміс з точки зору розміру та ефективності [13]. Ключові міркування для будь-якого з цих додатків включають форму антени, електричну стабільність при розміщенні на тілі, надійний процес виготовлення, який забезпечує підвищену механічну стабільність, що дозволяє впоратися зі

змінами положення тіла, артефактами руху, специфічністю об'єкта та вологістю (вологість/потілення). Ще одна важливе міркування – ненав'язливість таких антен. Потреба ненав'язливості диктує, що антени мають бути інтегровані в одяг користувача або прикріплені до тіла, щоб викликати мінімальне втручання або не заважати звичайному порядку людини. Це міркування дуже важливо, щоб звести до мінімуму незручності користувача у повсякденній діяльності, тим самим підвищуючи прийнятність системи за будь-яких обставин. Беручи до уваги ці вимоги, існує низка проблем, пов'язаних з виготовленням антен, що носяться. Більшість звичайних антен виготовляють із використанням друкованої плати (PCB), технологія, що ґрунтується на жорстких підкладках FR4 та інших скловолоконних/керамічних матеріалах, наприклад, від Rogers або Taconic. Отримані в результаті антени часто здаються нав'язливими при розгортанні на тілі, і їх легко інтегрувати в одяг. По-друге, такі антени та радіочастотні ланцюги повинні бути поміщені в захисні кожухи для запобігання окисленню та корозії в результаті потовиділення, що робить їх стабільними у широкому діапазоні умов навколишнього середовища. Кожух також корисний для захисту антени від механічних навантажень, що виникають внаслідок зміни положення. В останні роки розвиток технологій виробництва призвело до кількох спроб вирішити зазначені вище проблеми. Ці зусилля можна в основному розділити на такі категорії в залежності від типу виробничого процесу, що використовується [10]:

- Вишиті антени на тканинній основі
- Антени, залиті полімером
- Мікрорідкісні антени з інжекційними сплавами
- Струменевий друк, трафаретний друк та фотолітографія.
- Антени, надруковані на 3D-принтері

У пресі міститься ряд статей, що містять докладні огляди антен для систем BAN [14–27]. У [14–21] основна увага в огляді приділялася конструкції антен, обговорюючи їх застосування, проблеми та обмеження щодо роботи антен поблизу людського тіла. У [17, 20, 22 - 27] розглядаються різні матеріали і технології виготовлення антен для пристроїв, що носяться. Проте в цілому вони

зосереджені лише на певному класі матеріалів або технології виготовлення, наприклад, на текстилі або струменевому/графаретному друку [10].

## 1.2. Гнучкі широкосмугові антени на тканинній основі із шиттям

Гнучкі антени, вбудовані в одяг, є зручною альтернативою антенам, виготовленим з жорстких матеріалів. Такі антени будуються шляхом вишивки випромінюючих променів потрібної форми. елементи з використанням струмопровідних ниток безпосередньо на одязі. Оскільки вишиті антени легко інтегруються з одягом, вони успішно відповідають вимогам ненав'язливості пристроїв. електроніки. Вони також мають хорошу фізичну здатність витримувати повторювані деформації через зміни контуру людського тіла [10].

Крім того, комп'ютеризований процес виготовлення призводить до швидшого виробництва, що особливо корисно при масовому виробництві. Швейна машина з програмним керуванням для автоматизованого проектування (САПР). зазвичай використовується виготовлення вишитих антен. Зі зображень дизайну, імпортованих у програмне забезпечення САПР, створюється оцифрований дизайн, який завантажується в швейну машину для використання як посібник з вишивання. Перед початком вишивки необхідно ретельно відрегулювати натяг пряжі, швидкість вишивання та відстань між стібками. Однак для простої структури нашивки провідна нитка також може бути вишита вручну [10].

Як правило, текстильні вироби мають вигідну характеристику низької діелектричної проникності через свою пористу природу [28] представлено вимір діелектричної проникності тканини резонансним методом. Були визначені діелектричні константи шести тканинних матеріалів, включаючи джинсову бавовну, бавовну, змішану з поліефіром, та поліестер. Оскільки він показує, що всі значення діелектричної проникності нижчі ніж два [10].

Антени, розроблені за допомогою цього методу, можуть мати компланарну топологію або підтримуватися шаром заземлення. На рисунку 1.2 показаний прототип вишитої антени у формі літери Е, яка розроблена та виготовлена на



частоту 5 ГГц. Антена має вишиту Е-подібну мікросмужкову нашивку з одного боку та вишиту заземлюючу пластину з іншого боку. Ця антена була вишита хрестиком п'ятифіламентної мідної нитки від Elektrisola на поліефірному стабілізаторі, а потім пришита до повсті, яка використовувалася як основа [10].

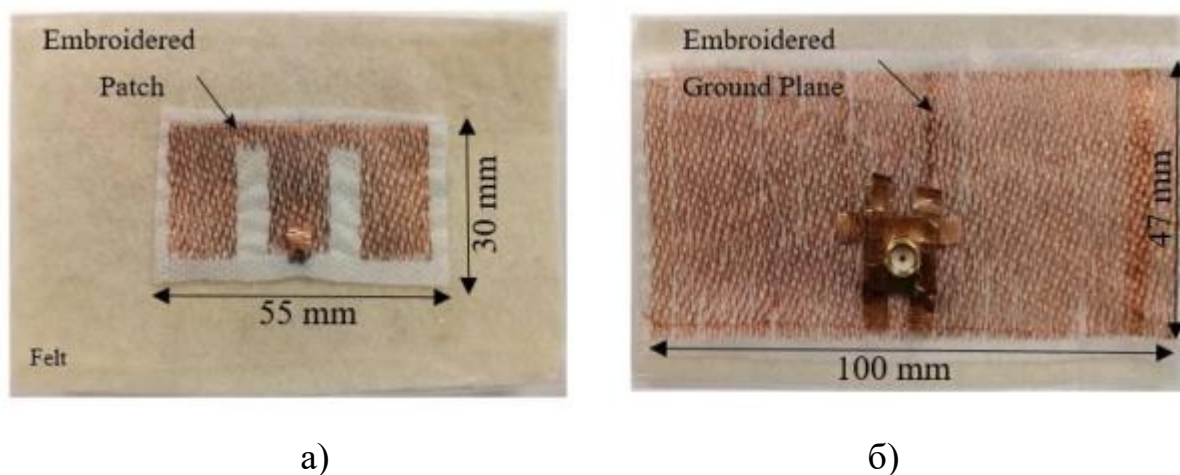


Рисунок 1.2 - Антена Е-подібної форми, виготовлена методом вишивки (а) вид зверху; (б); вигляд знизу [10]

Ключові аспекти вишитих антен включають характеристику властивостей матеріалу тканини, а також провідних ниток і, розумною мірою, точність вишитих малюнків, щільність стібка та товщину тканини [29]. Різні механічні фактори, такі як натяг нитки, швидкість вишивання, тип голки, розмір нитки та тип нитки, що становлять малюнок човникового стібка, також мають вирішальне значення не тільки для характеристик антени, але і для відтворюваності антени [30, 31]. Деякі струмопровідні нитки комерційно доступні, наприклад, X-static [32], Shieldex [33], Elektrisola [34, 35], MCEY [36] та Amberstrand [37]. У таблиці 2 показані деякі приклади вишитих антен, виготовлених з різних струмопровідних ниток та нанесених на різні підкладки [10].

Щільність вишитих візерунків має бути досить високою, щоб відстань між сусідніми нитками стала дуже малою порівняно з довжиною хвилі [38, 39]. Деталі антени виготовлені з вишивки, на відміну від провідних тканин, за своєю природою неоднорідні, а їх провідність залежить від малюнка і щільності

рядка через напрям струму. потік (див. рисунок 1.3). Це, у свою чергу, може спричинити зсув резонансної частоти та вплинути на ефективність. Рідкісні малюнки зміщують резонансну частоту антени у бік нижчих частот, що є наслідком явно більшого електричного розміру [29], тоді як надмірне збільшення щільності зшивки зменшує електричну довжину, викликаючи локальну нейтралізацію електричного струму частинами антени [32]. Порівняльні дослідження щільності прошивки були проведені в [38, 40], і напрямки основи та тканини були визначені як найбільш перспективне рішення для отримання досить хороших характеристик антени [10].



Рисунок 1.3 - Вишиті латки з різними напрямками стібка (а) горизонтальний малюнок; (б) вертикальний малюнок; (в) діагональний візерунок; (г) складний візерунок [10]

У [29] представлено порівняння трьох схем вишивки: горизонтальних, вертикальних та діагональних ліній. Результат показує, що вертикальна орієнтація різьблення є кращим напрямком для першої моди випромінювання і дає найкращі характеристики для антен з більш високою щільністю петель. Більш того, антени з діагональним рядком працюють краще, ніж горизонтальні, через те, що струм тече у кращому напрямку. Крім того, показано, що резонансні частоти для горизонтальних і діагональних ділянок нижче, ніж резонансні частоти для вертикального напрямку рядка, можливо, через збільшення довжини шляху проходження струму та збільшення індуктивності та ємності, спричинених анізотропною природою провідників [10].

Таблиця 1.2 - Приклади вишитих антен [10]

Провідник	Провідник $R_s$	Матеріал підкладки	Підкладка $\epsilon_r$	Підкладка $\tan \delta$	частота (МГц)	Тип ан- тени
Металевий композит Пряжа для вишивки (MCEY)	3.88 $\Omega/m$	Тканий поліестер	1.15	NA	87.5– 108	Скла- дений диполь
Срібний Бурштинові волокна	0.75 $\Omega/m$	NA	NA	NA	900 (41.6%), 1900 (75.8%), 2450 (65.6%)	Патч антена
Срібний Бурштинові волокна	0.8 $\Omega/m$	PDMS	4.2	0.01	2200	Патч антена
Бурштинове срібло 66	6.5 $\Omega/m$	Таконік RF-45	4.5	0.0037	2400	Патч антена
Нитка Shieldex	NA	Бавовняна тканина	1.8	0.018	900	Патч антена
Elektrisola	1.9 $\Omega/m$	Organza	Близька до повіт- ря	Близька до повіт- ря	760 (15%)	Диполь

В [29] мається на увазі, що найкращі характеристики вишитої антени можуть бути досягнуті, якщо вишивка виконується за схемою розподілу струму антени. Тоді виникає проблема від антен зі складним розподілом струму, наприклад ширококутових антен або модових антен вищого порядку [39]. Ство-

рення оцифрованого вишитого малюнка за фактичним поточним малюнком таких антен не завжди є простим процесом [10].

Однак у [39] було проведено дослідження, що показує, що у разі антен зі складним розподілом струму процес можна спростити, використовуючи відповідний простий шаблон зшивки, наприклад, вертикальне та горизонтальне напрямки. Збільшена щільність різьблення, тобто сусідні різьблення, що стикаються один з одним або індуктивний зв'язок між ними дуже висока, може бути застосована так, щоб вона нагадувала суцільну провідну поверхню, хоча при цьому неминучі компроміси у продуктивності та вартості [10].

Деякі інші фактори, які необхідно враховувати у техніці вишивки, - це точність, провідність та вартість процесу вишивки. У деяких випадках точність до 0,3 і 0,1 мм - що є типовою геометричною точністю виготовлення друкованих плат - була досягнута за рахунок використання промислових провідних ниток меншого діаметру, наприклад, 40- та 20-прядних Liberator, та 7-ниткова посріблена мідь Elektrisola [30, 34, 35]. Було виявлено, що ці різьблення мають відносно низький опір постійному струму. Цей підхід успішно застосовувався для створення різних топологій проектування з різним рівнем складності, наприклад дипольних, архімедових, синусоїдальних, зубчастих та трапецієподібних форм [10].

Зважаючи на ціну комерційної провідної тканини, процес вишивки, як правило, виконувався один раз поверх бажаного малюнка, щоб знизити загальну вартість виготовлення. Однак деякі дослідники, наприклад, [41], застосували процес вишивки до розробленого малюнка двічі, тобто техніку двошарової вишивки. Це було зроблено для досягнення високої щільності зшивання, низьких фізичних розривів і, отже, вищої провідності вишитого шару [10].

Крім того, щоб знизити вартість техніки вишивання, було представлено неоднорідну техніку вишивки [42]. У цьому методі провідні нитки були вишиті нерівномірно ділянкою антени після більш точного спостереження за розподілом струму прямокутної плями основної моди. Кількість горизонтальних ліній у патч-антенні з однорідною сіткою (NMPA) зменшено, оскільки горизонтальні

шляхи провідників виявилися менш важливими в режимі ТМ 01. Структуру NMPA, поміщену на повсть, порівнювали з її аналогом, що має 100% покриття провідника. Результати показали, що при покритті дротів лише на 20% ефективність 60% може бути досягнуто, у той час як центральна частота і повернення втрати на 2,45 ГГц не були порушені. У роботі було висловлено припущення, що методика дозволяє значно знизити вартість виготовлення та дозволити для гнучкішої антени з мінімальним погіршенням характеристик антени [10].

Деякі проблеми, пов'язані з технікою вишивки, включають погіршення провідності вишитого шару при пранні, що, своєю чергою, впливає на властивості антени [45]. Крім того, вони схильні зношуватися під час процесу вишивки, якщо не використовувати правильну голку, правильну швидкість та натяг, що потребує дуже точного процесу виготовлення. Як альтернатива вишивки, комерційні ткани провідні тканини, які доступні у вигляді тканинних листів, використовуються для реалізації металевих малюнків антен, вшитих в одяг, але вони страждають від тих же проблем дегенерації провідного шару, а також зношування, які можуть бути подолані шляхом формування тканини на верстаті лазерного різання (див. рисунок 1.4) [10].

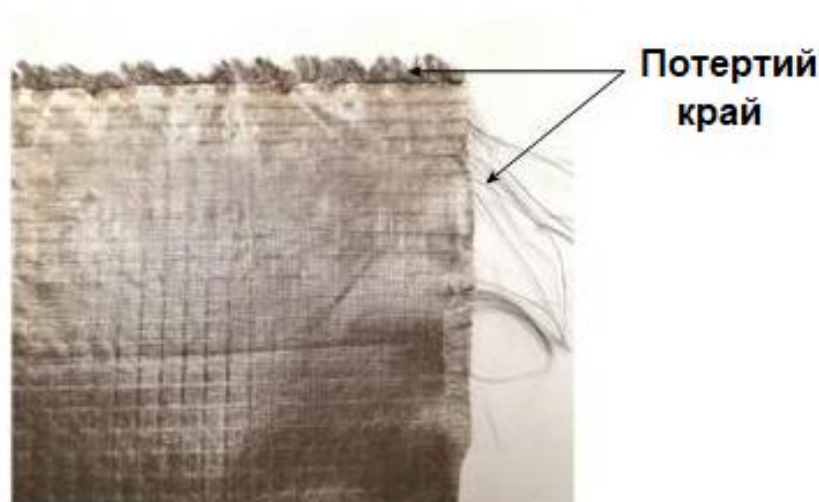


Рисунок 1.4 – Зношеність на краю тканини [10]

### 1.3 Полімерні вбудовані антени

Носимі антени, виготовлені з гнучких полімерів, є альтернативою вишитим антенам на тканинній основі. Полімери в цілому є матеріалами з низькою діелектричною проникністю і низькими втратами, які роблять цей варіант слушним для високочастотних додатків. Крім того, вони стійкі до широкого спектру середовищ завдяки низькому водопоглинанню, а також високій гнучкості та розтяжності. З цієї причини як підкладки антени використовуються гнучкі полімери, такі як полідиметилсилоксан (PDMS) [46] та рідкокристалічний полімер (LCP) [10,47].

Основною проблемою, виявленою при використанні полімерів для розробки антени, є погана адгезія металу до полімеру, що може викликати відділення провідних частин антени непровідні частини, такі як підкладка. З цієї причини полімери були використані для створення антен дротяного типу, які вимагають мінімального поверхневого контакту між провідною частиною та полімером. Деякі перспективні рішення, що дозволяють обійти цю проблему, містять провідні частини антени в тонкому шарі полімеру. Такий підхід до впровадження був продемонстрований за допомогою різних типів струмопровідних матеріалів. Серед них - листи вуглецевих нанотрубок [48], мідна сітка [46], срібні нанодропи [49, 50], вишиті нитки [51] і - недавно - провідні тканини [52, 53], які виявилися простими, але ефективними для вирішення [10].

Вбудована антена захищає провідний шар від агресивних середовищ, температур, вологості, які можуть виникнути через багаторазове потовиділення та прання, які можуть вплинути на слабке кріплення між металом та полімером [10,48,50].

Серед полімерів PDMS має такі переваги, як висока гнучкість і розтяжність, а також має прийнятно прийнятний коефіцієнт втрат на мікрохвильових частотах. Тонка настройка PDMS відносної діелектричну проникність можна легко зробити шляхом включення інших матеріалів, наприклад, керамічного порошку (табл. 1.3). Додаткові діелектричні втрати, нижчі поля окантовки через

високу діелектричну проникність, які погіршують ефективність слід враховувати антену [54]. Більше того, більша кількість керамічного навантаження впливає на гнучкість PDMS і ускладнює процес його виготовлення, оскільки суміш стає густішою і, отже, її складніше змішувати до однорідного стану [55]. Приготування PDMS також може бути виконане за кімнатної температури за допомогою простого недорогого процесу [10,52].

Таблиця 1.3 - Приклади вбудованих антен [10]

Провідник	Провідник $\sigma$ або $R_s$	Матеріал підкладки	Підк- ладка $\epsilon_r$	Підкла- дка $\tan \delta$	частота (МГц)	Тип антени
Вуглецева нанотрубка	$0.9 \Omega/\text{sq}$	PDMS	3.8	0.015	2250	Патч антена
Срібні на- нодроти	$8.13 \times 10^3$ S/m	PDMS	2.67	0.01	2920	Патч антена
Бурштинові волокна	1.6–2.6 $\Omega/\text{m}$	PDMS	3	0.02	915	Проводова антена
мідна фо- льга	NA	PDMS	2.7	0.013	5800	мікросмуж- кова матриця
Нейлон з нікелево- мідно- срібним покриттям	$0.01 \Omega/\text{sq}$	PDMS	2.8	0.02, 0.04	2450 5800	Патч антена
Мідна мік- росітка	$3.28 \times 10^4$ S/m	PDMS	2.8	0.02	2460...2 940	Реконфігу- рована Патч антена

Завдяки своїм характеристикам водостійкості, хімічній інертності, високій термостійкості (до 400°C) та стійкості до впливу ультрафіолету, PDMS дуже

стійкий до екстремальних умов навколишнього середовища. У таблиці 3 показано кілька антен, побудованих за допомогою PDMS. У цій таблиці значення відносної діелектричної проникності знаходяться в діапазоні від 267 до 38, а коефіцієнти втрат - від 001 до 004. Можна відзначити, що відносна діелектрична проникність і коефіцієнт втрат PDMS можуть змінюватись, наприклад, для однієї і тієї ж частоти 5880 МГц, різниця в коефіцієнті втрат між PDMS, використаної [56] і [57], на порядок величини. Таким чином, визначення електричних властивостей PDMS як частини циклу проектування антени має вирішальне значення, а не лише на підставі даних, що повідомляються. Різні ефективні підходи до характеристики електричних властивостей описані у [58] (рис. 1.5).

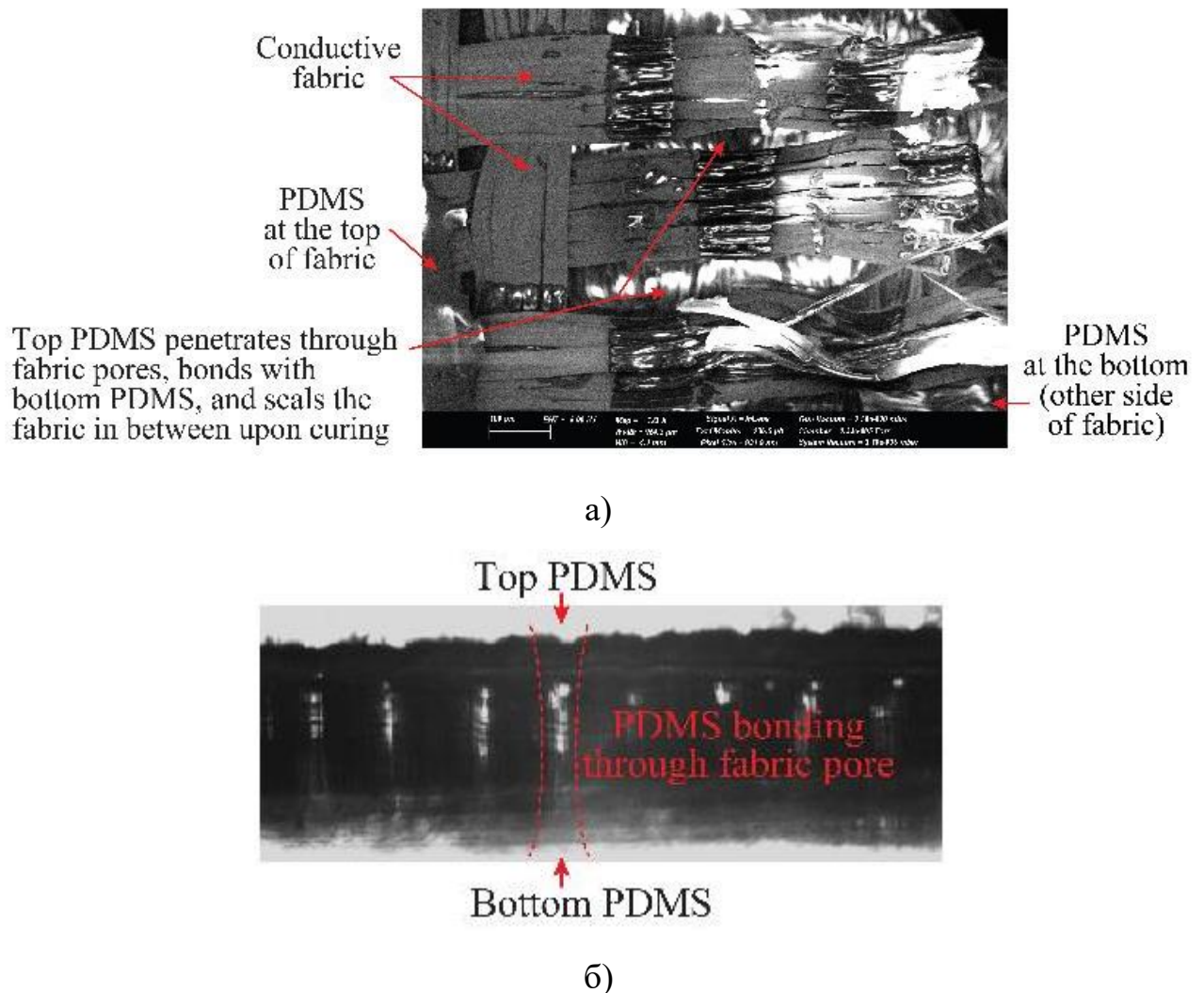


Рисунок 1.5 - Сканована електронна мікроскопія тканини (а) вид зверху; (б) вид збоку [10]



Технологія провідної тканини із вбудованим PDMS надає чудові можливості для реалізації різних типів конформних антен. Антени були виготовлені з струмопровідної тканини, яка пізніше була впроваджена у полімер. Досягнуто досить сильної адгезії провідників до діелектрика. Чудові результати з погляду інтеграції можуть бути досягнуті, коли для виготовлення металевих частин використовується провідна тканина. Причина в пористій природі провідної тканини, що дозволяє створювати полімер-з'єднання. Це з'єднання допомагає герметизувати PDMS. тканинне кріплення, що забезпечує міцну механічну інтеграцію двох матеріалів. Таке явище стало зрозумілим завдяки спостереженню зразком під растровим електронним мікроскопом (SEM), як показано на рисунку 1.5 [10].

Процес виготовлення таких антен з провідної тканини з полімерним покриттям показаний на рис. 1.6. Антени можна виготовляти пошарово, починаючи знизу та закінчуючи верхній шар. Тут полімер ПДМС, який є одним з найчастіше використовуваних полімерів для реалізації гнучких антен, що носяться, щоб пояснити процес виготовлення. Покроковий процес виготовлення антен, залитих полімером із провідної тканини, як описано в [52], наводиться нижче [10]:

1. Приготуйте розчин PDMS з необхідною діелектричною проникністю і тангенс кута втрат, відлійте форму, основу і відріжте тканину, що проводить, вручну, слідуючи розмірам антени.
2. Прикріпіть першу форму до основи силіконовим герметиком, влийте розчин PDMS, провести дегазування у вакуум-ексикаторі протягом 30 хвилин, а потім витримати в печі при  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом приблизно 2 годин.
3. Прикріпіть заземлюючу пластину поверх затверділого нижнього ізоляційного шару тонкої нетвердої. Розчин PDMS, відштовхнути бульбашки, що виникають між ними, і витримати в духовці при  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  20 хв.
4. Повторіть крок 2 з другою формою, щоб зробити середній шар PDMS.
5. Повторіть крок 3 основного патча.

6. Повторіть крок 2 з третьою формою, щоб зробити герметизуючий верхній шар.
7. Обережно зніміть прототип з форми. За необхідності обріжте зайві шари PDMS по краях антени.

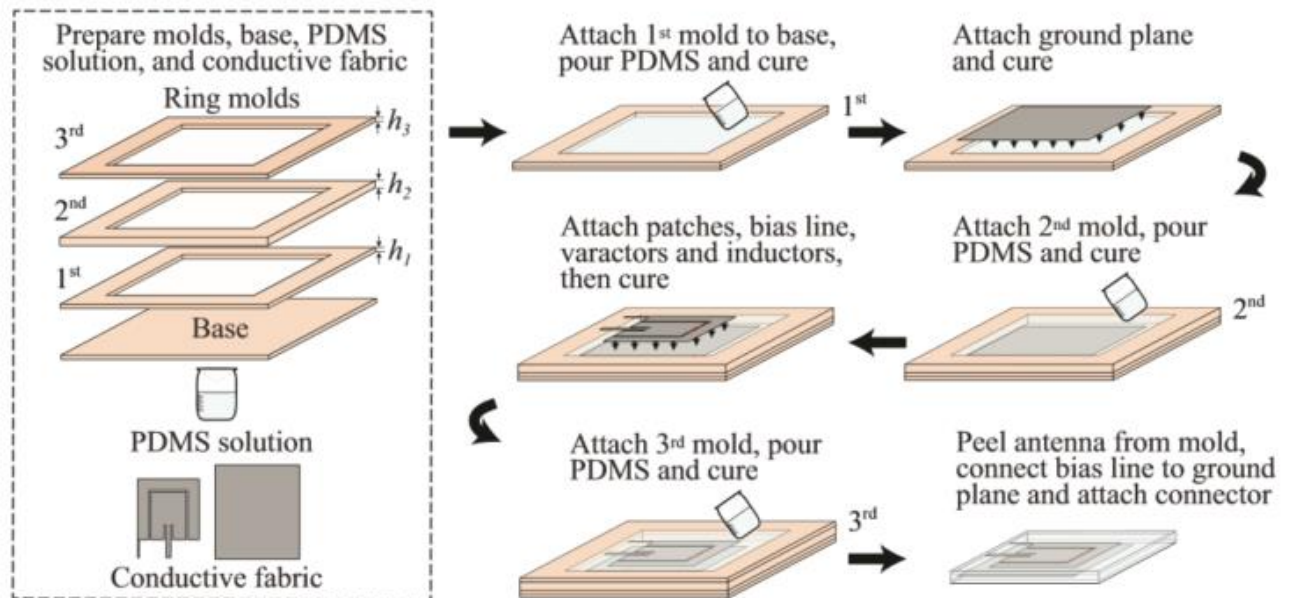


Рисунок 1.6 - Виробничий процес для вбудовування тканин у PDMS

На рис. 1.7 показаний вид зверху, збоку та вид вигину двох прототипів мікросмужкової антени, виготовлених на основі техніки вбудовування у провідну тканину на двох підкладках: чистий PDMS та керамічний композит PDMS [10,60].

У методі заливання провідність провідних частин відносно низька порівняно з металами, що впливають на характеристики антени. Крім того, тангенс кута втрат полімерів, особливо на високих частотах, великий, що впливає на ефективність антени і як наслідок, впливає на посилення антени. Щоб компенсувати це, [60] було запропоновано використовувати різні провідні тканини для різних провідних частин антени, щоб покрити тканину подвійним покриттям, розробити матеріал покриття з більш високою провідністю або зменшити втрати полімеру через включення з інших матеріалів [10].

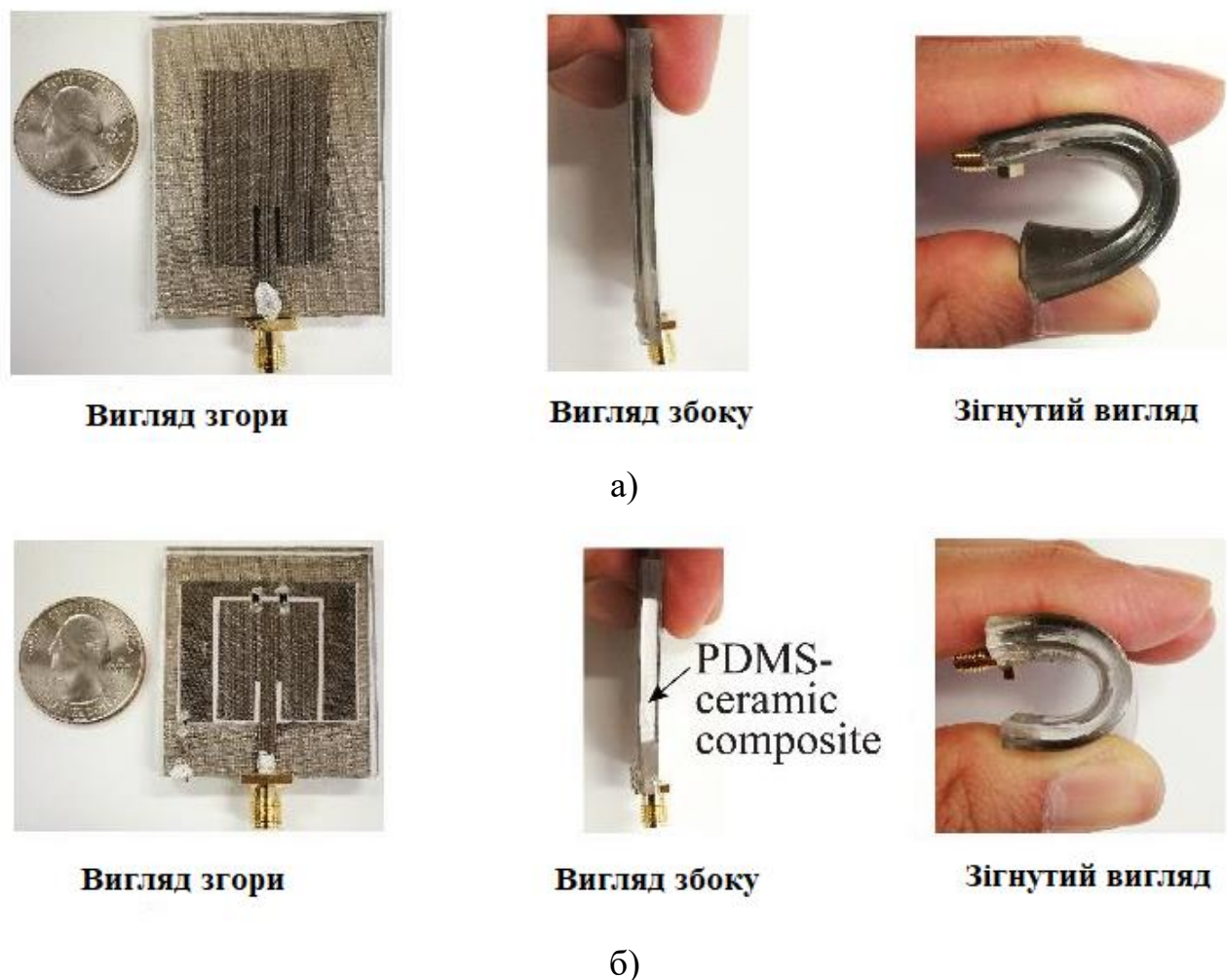


Рисунок 1.7 - Фотографії виготовлених антен із провідної тканини з вбудованим PDMS (а) з чистим PDMS; (б) з композитом ПДМС-кераміка [10,60]

#### 1.4 Мікрорідинні антени з інжекційними металами

Один з цікавих методів виготовлення гнучких антен, таких як дипольні антени, - це лиття металевих сплавів. У цьому методі рідкі метали і сплави рідких металів, такі як евтектичний галій 75%, індій 25% (EGaIn) і галінстан, можуть бути використані як гнучкі провідні частини і будуть вводитися в гнучку підкладку через серію сітчастих мікрорідинних каналів. Для створення мікроканалів зазвичай використовується силікон TC5005 та полідиметилсилоксан PDMS. У таблиці 1.4 показано кілька прикладів антен, у яких для побудови мікроканалів використовувався PDMS. Цей метод забезпечує альтернативу використанню струмопровідних листів на гнучкій підкладці, забезпечуючи, таким

чином, виняткову стійкість до механічних навантажень і тиску, наряду з високою провідністю, як показано в таблиці 4. Використання ливарних сплавів дає підвищену ефективність антени за рахунок більш високої провідності, ніж у комерційних провідних тканин [61]. Таблиця 1.4 показує, що ефективність випромінювання цього методу переважно висока, понад 70%, навіть при деформації і згині [10].

Таблиця 1.4 - Приклади антен на основі інжекційних сплавів [10]

Провідник	$\sigma$ провідника	Матеріал основи	$\epsilon_r$ основи	Тангенс $\delta$ основи	Частота (ГГц)	Ефективність (%)	Тип антени
EGaIn	$3.46 \cdot 10^4$ С/м	PDMS	2.67	0.0375	1.91- 1.99	90	Дипольна
Галінстан	$3.46 \cdot 10^6$ С/м	TC5005	2.8-3.1	-	1.3-3	80	Реконфігурована накладка
Галінстан	$3.46 \cdot 10^6$ С/м	PDMS	3	0.01	3.1- 10.06	70	Планарний інвертований конус
EGaIn	$3.46 \cdot 10^4$ С/м	PDMS	3	0.05	3.45	60	Накладка

У таблиці 1.4 прийняті такі позначення:  $\sigma$  — ефективна провідність,  $R_s$  — опір листа,  $\epsilon_r$  — діелектрична проникність, тангенс  $\delta$  — коефіцієнт втрат.

Завдяки передовим розробкам у галузі мікрофлюїдики можна побудувати дуже тонкі мікроканали, що призведе до створення високоточних мініатюрних гнучких антен. Гнучкість цих антен загалом висока. В [62] антена може розтягуватися при деформації до 300%, а електрична довжина антени-накладки змінюється в залежності від розтягування, демонструючи можливість налаштування частоти від 1,3 до 3 ГГц. Інжекцією металу в мікроканали можна керувати за

допомогою напруги зміщення, а також шляхом регулювання тиску всередині каналів. Більш того, антени на основі ливарних сплавів та з мікроканалами, які можуть самовідновитися у відповідь на гострі порізи, були описані в [10,61].

Поки що кілька монопольних та дипольних антен мають антени з копланарними заземлюючими площинами, розроблені з використанням цього методу [61–64]. Дротові антени виявилися надійнішими з цим методом, оскільки мікроканали з відносно невеликими діаметрами рівномірно розподіляють метал каналом. Було встановлено, що ширші мікроканали важче отримати для підтримки рівномірного розподілу металу. Крім того, часто буває важко перетворити рідкий метал на канали з обмеженням сторін висоти та ширини. Друковані антени, наприклад, щілинні або мікросмужкові накладки складно реалізувати за допомогою цієї техніки [10].

У мікрофлюїдиці було досягнуто значних успіхів, і тому повідомлялося про різні підходи до закачування рідкого металу. Антена-накладка ручної роботи, що живиться через щілину з апертурним зв'язком, була сконструйована з використанням планарного резервуару з галінстану (сплав Ga, In і Sn), вставленого в силіконову підкладку TC5005 [60]. У цьому випадку Галінстан вводили у резервуар за допомогою шприца. В [65] мікроканали використовуються для формування накладки із заземлюючим шаром на задній стороні антени (див. рисунок 1.8) [10].

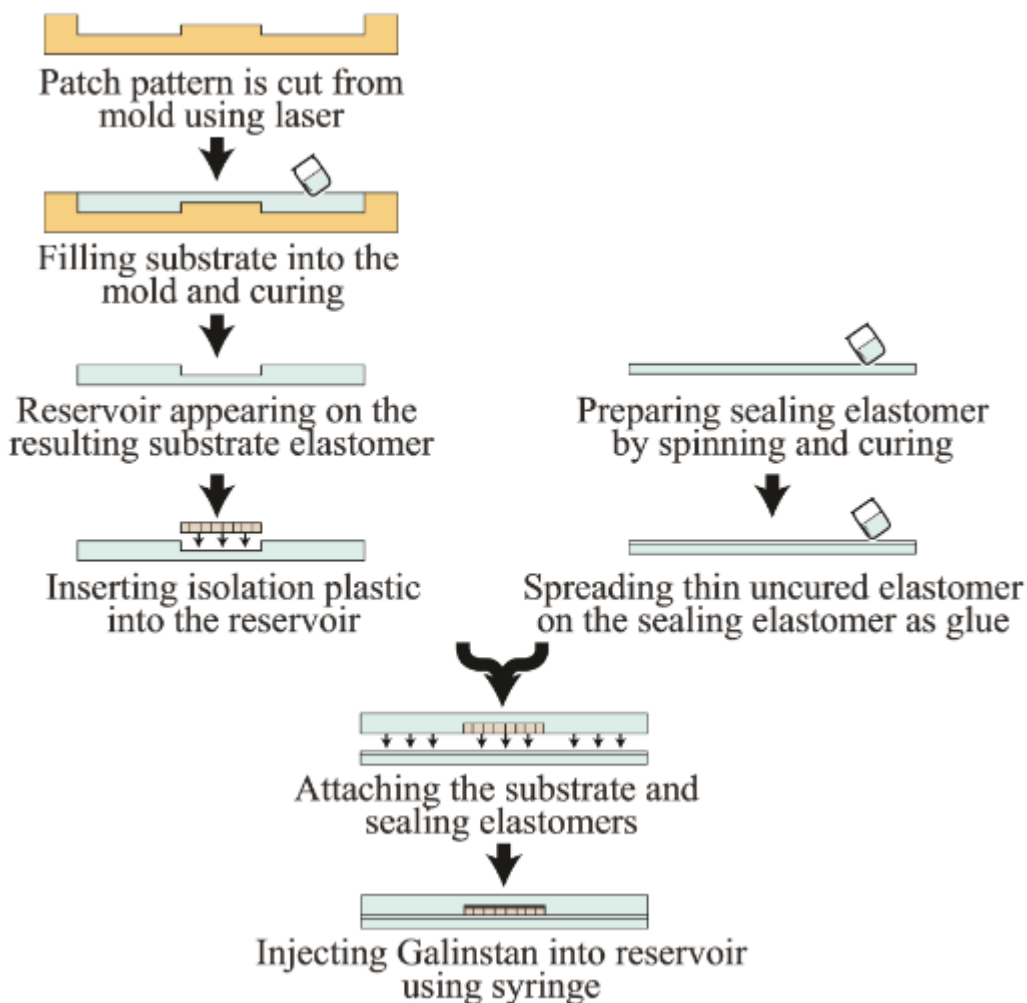


Рисунок 1.8 - Етапи виготовлення прототипу накладки ручної роботи з литтям металу

Скориставшись реологічними властивостями металу, мікрофлюїдні канали шириною 1 мм були використані в [64] для створення гнучкої мікросмужкової патч-антени, що працює на частоті 3.4 ГГц. Експериментальна характеристика цієї антени продемонструвала ефективність випромінювання 60% і спостерігалася стабільна робота при різних вигинах. З використанням цього підходу також було створено кілька більш універсальних антен. На рисунку 1.9 показані мікрофлюїдні канали, заповнені EGaln для мікросмужкової антени.

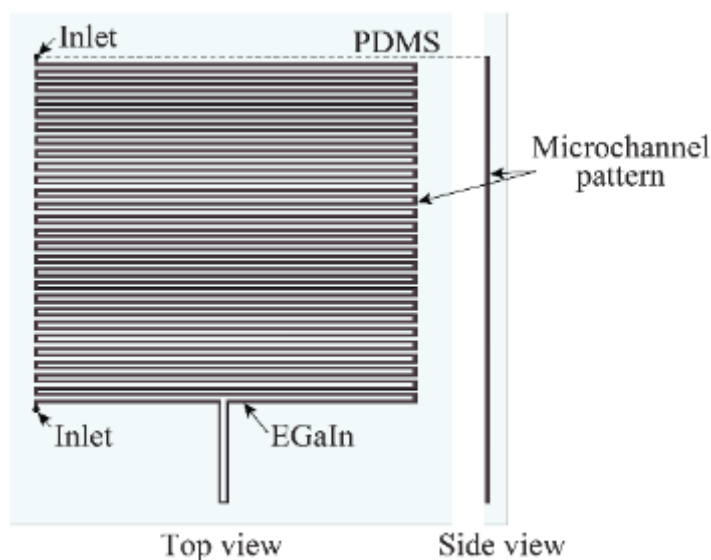


Рисунок 1.9 - Вид зверху та вид збоку мікросмужкової антени, виготовленої шляхом упорскування сплавів у мікрорідинні канали [10]

В [63] представлена гнучка планарна антена з перевернутим конусом (PICA), яка була виготовлена шляхом введення рідкого металевго сплаву кімнатної температури в мікרוструктуровані канали в листі PDMS. Представлений PICA працює на частотах від 3 до 10 ГГц із ефективністю випромінювання понад 70%. В [65] був продемонстрований тривимірний гнучкий IFA, що працює на частоті 885 МГц на гнучкому пластику NinjaFlex, виготовлений з використанням рідкого металу Galinstan [10].

Важливою умовою при застосуванні цього методу виготовлення є забезпечення того, щоб повітря не потрапило в мікроканали під час процесу упорскування рідкого металу, оскільки розриви, що виникають в результаті, порушили б струми і, отже, функціональність антен. Це на додаток до можливості втоми або витoku рідкого металу з гнучкої підкладки в суворих умовах або в умовах високої напруги [10].

### 1.5 Струменевий друк, трафаретний друк та фотолітографія

Друк на гнучкій підкладці – ще один привабливий підхід для створення легких та гнучких антен, оскільки її можна наносити на різні типи підкладок. За

допомогою цього методу були успішно розроблені різні типи антен з різними діапазонами робочих частот, як можна побачити в таблиці 5, хоча антени на основі копланарного хвилеводу (CPW) зазвичай переважні через наявність провідних частин (наприклад, площині заземлення і випромінювача) з одного боку, що знижує складність виготовлення [10].

Таблиця 1.6 - Приклади антен на основі технології друку [10]

Провідник	$\sigma$ або $R_s$ провідника	Матеріал основи	$\epsilon_r$ ос- нови	Тангенс $\delta$ осно- ви	Частота (ГГц)	Тип антени
Наночастинки срібла	$1 \cdot 10^7$ С/м	Каптон	3.5	-	3.1-10.6	Струменево- надрукований монополь
Срібна паста	$1.7 \cdot 10^4$ С/м	NinjaFlex	2.8	0.05	2.13- 3.25	Антенна- накладка
Електродаг	0.025 Ом/м <sup>2</sup>	Бавовна-поліестер	1.6	0.02	2.45	Трафаретно надрукована накладка
Графен	$4.47 \cdot 10^4$ Ом/м <sup>2</sup>	Пористий еласто- мер, надрукований на 3D-принтері	3.6	0.06	2.45	Струменево- надрукований диполь
Мідь	-	Рідкокристалічний полімер	3.1	0.002	3.1-10.6	Конічна щі- линна антена
Наночастинки срібла	0.3 Ом/м <sup>2</sup>	Папір з полімер- ним покриттям та полікарбонат	2.65	0.001	0.8-1.1	Струменево- надрукований монополь з АМС на па- пері



У таблиці 1.6 використані такі позначення:  $\sigma$  — ефективна провідність,  $R_s$  — опір листа,  $\epsilon_r$  — діелектрична проникність, тангенс  $\delta$  — коефіцієнт втрат.

Струменевий друк як одна з технологій друку стала популярним рішенням для швидкого прототипування антен із відносно невисокою вартістю [72,73]. Завдяки використанню крапель чорнила розміром до кількох піколітрів принтер може створювати малюнок з надзвичайно високою роздільною здатністю [74]. Крім того, використання чистої кімнати не обов'язкове. Як провідні матеріали широко використовуються провідні чорнила на основі наночастинок срібла, вуглецю, міді та золота. З іншого боку, для підкладок було успішно продемонстровано використання різних типів гнучких матеріалів, включаючи поліетиленнафталат (PEN) [73], поліетилентерефталат (PET) [75], [76]; поліімід каптону [77], папір [78] ] та PDMS [80]. На рисунку 10 показаний прототип патч-антени, надрукований на струменевому друку, зі смужкою імпедансу 26-40 ГГц на підкладці з поліетилентерефталату [10,81].

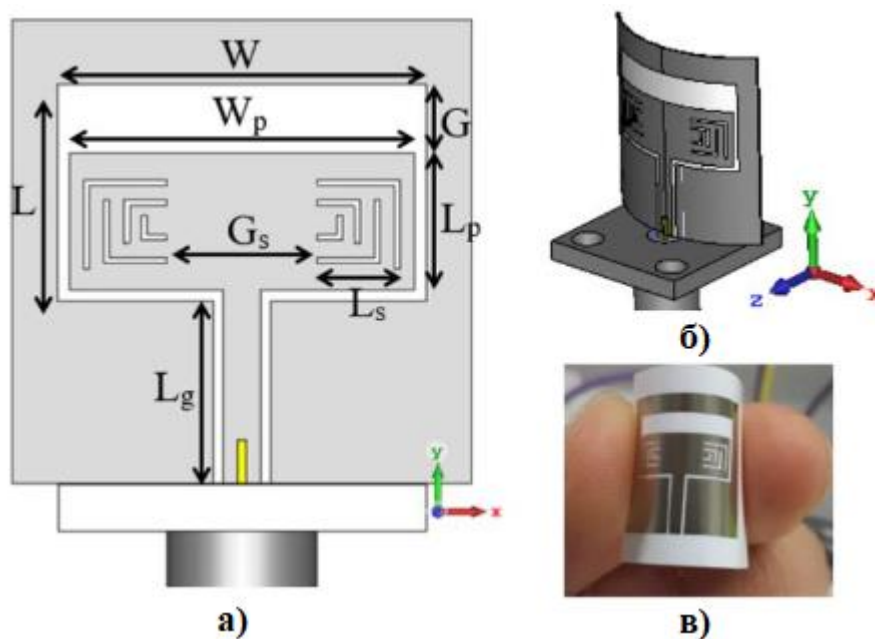


Рисунок 1.10 - Антена-накладка, виготовлена на основі ПЕТ-плівки методом струменевого друку: (а) змодельована модель; (б) імітація вигнутої антени; (в) виготовлений прототип [10,81]

Деякі характеристики, що визначають якість друку в типах drop-on-demand (DoD) і безперервного струменевого друку: включають властивості чорнила (наприклад, в'язкість та поверхневий натяг), характеристики поверхні основи (наприклад, змочування), шари друку для провідності, температура платформи, параметри друкуючої головки та діаметр частинок. Крім того, при виготовленні слід враховувати деякі проблеми, такі як засмічення сопел і несумісність деяких типів провідних чорнила, через більший розмір частинок [10].

Приклад виготовленої антени з використанням методу струминного друку був представлений в [77], де чорнило з наночастинками срібла нанесли на каптонову підкладку за допомогою принтера Dimatix DMP-2831. У цій роботі відстань між краплями наночастинок 30 мкм та п'ять провідних шарів були ретельно обрані для отримання точних розмірів, а також хорошої провідності.

Струменевий друк на грубих, нерівних або пористих тканинах все ще є складним завданням через малу товщину провідних шарів і нездатність тканини витримувати температуру затвердіння фарби і вигин. Наразі докладаються зусилля до спроб вирішити ці проблеми. В [72] шляхом розробки міжфазного покритого шару, який з'єднується зі стандартною бавовняною поліефірною тканиною, створюється гладка поверхня для струминного друку. Ефективність антени понад 60% була досягнута за допомогою одного шару провідних чорнил, що також значно заощаджує час та витрати на виготовлення та покращує роздільну здатність друку. Запропоноване антенне срібло (U5714) було обране для провідних чорнил. Автори в [82] також вводять нанесений трафаретною печаткою інтерфейсний шар для зменшення шорсткості поверхні поліефірно-бавовняного матеріалу, що полегшує друк на суцільній провідній поверхні. Запропонована антена розміщена на Taconic RF-45, а ефективність 53% була досягнута за допомогою двох шарів фарби [10].

Фотолітографія - це ще одна техніка друку, яка являє собою процес виготовлення металевих схем з використанням фоторезисту. За допомогою цього методу можна отримати складні моделі, але необхідно враховувати такі важливі питання, як провідність, наявність небезпечних хімікатів і тривалість багатос-

тупінчастого процесу [66]. Одним із методів фотолітографії є створення малюнка з ліній, що включає створення негативного зображення бажаного малюнка за допомогою програми автоматизованого проектування. Далі слідує нанесення провідного полімеру на підкладку/плівку, а потім зняття надрукованої маски шляхом застосування ультразвукової енергії до підкладки [10,66].

### 1.6 3D-друковані антени

Популярність технології адитивного тривимірного друку для носимих і конформних антен пояснюється її величезними перевагами: комерційна доступність принтерів і матеріалів, можливість власного виготовлення, швидкий процес виготовлення, можливість виготовляти складні тривимірні структури з декількох матеріалів. і можливість змінювати щільність об'єкта, що друкується [83–86]. Використання нитки NinjaFlex як дуже гнучкого та розтяжного матеріалу від Fenner Drives, Inc. в 2014 році дозволило застосувати 3D-друк до носимих антен. Серед сучасних технологій тривимірного виробництва – моделювання наплавленням (FDM), стереолітографія (SL) та лазерне спікання – метод FDM дозволяє друкувати на схемі-наклідці, вирізаній в основному з матеріалів на основі пластику [84]. Подано ряд методів виготовлення гнучкої антени з використанням технології виготовлення тривимірного друку. У [84] квадратна патч-антена на частоті 2,4 ГГц виготовлена з використанням нової гнучкої нитки розжарення, придатної для тривимірного друку, на основі NinjaFlex і випробувана в різних умовах вигину. Ця нова гнучка нитка розжарення для тривимірного друку призначена для виготовлення підкладки патч-антени. Щільність друкованого матеріалу змінюється для контролювання діелектричної проникності і товщини підкладки. Рамкова антена на частоті 2,4 ГГц також виготовляється за допомогою технології тривимірного друку з використанням тривимірного принтера на основі FDM і з використанням NinjaFlex, гнучкого матеріалу для тривимірного друку напівсферичної підкладки підкладки[87]. Пропонуєть-

ся надширокосмугова несиметрична антена на гнучкій підкладці адитивного виробництва на основі технології виготовлення плавких вставок. [88] RFID-мітки на основі графену на 100% бавовняної тканини з використанням графенового чорнила на водній основі (HDPlas IGSC02002) виготовляються за допомогою настільної системи дозування з прямим записом серії nScript. Метою роботи була перевірка можливості застосування тривимірного дозування із прямим записом для формування зв'язку антена – ІС. У [67] виготовлення антени виконується за допомогою фарбування пензлем. Розтяжна срібна провідна паста наноситься пензлем на друковану основу NinjaFlex 3-D, а структура термічно твердне [10].

### 1.7 Методи виготовлення гнучких носимих антен міліметрового діапазону

У світлі передових технологій виробництва ми розглянули смугу частот до НШП. У цьому розділі обговорюється прогрес і проблеми в розробці носимих антен, в діапазонах частот міліметрового діапазону [10].

Останнім часом технології міліметрового діапазону приділяється багато уваги через її величезний потенціал пропускної здатності. Навіть невелика смуга пропускання, наприклад 5-10% у мікрохвильових діапазонах, призводить до досить великої смуги пропускання в міліметровому діапазоні, що, своєю чергою, може використовуватися для надшвидкої передачі даних [89]. Така характеристика дуже корисна для додатків з вимогами до затримки, таких як служби зв'язку, що імплантуються, і роботизовані інвазивні процедури в охороні здоров'я. Таким чином, антени, що носяться на мВт, привабливі для високопродуктивних застосувань ближнього і середнього радіусу дії [10].

Визначення характеристик і моделювання поширення в середовищі людського тіла має першорядне значення, оскільки ця інформація важлива не тільки для попереднього проектування антен і носимих систем, але і для тестування таких антен *in vitro* з урахуванням нормативних вимог. Елементи людського тіла стають електрично більшими на частотах міліметрового діапазону, особливо

в порівнянні з дуже маленькими та тонкими елементами антен, і тому класичні повнохвильові методи стають неефективними [10].

Можливі чисельні підходи та пов'язані з ними компроміси з такими методами, як модель трасування променів, метод кінцевих різниць у часовій області (FDTD) та метод моментів (МТМ) обговорюються у [10,90].

Деякі аналітичні, чисельні та експериментальні дослідження поширення в тілі на частоті 60 ГГц з використанням шкірно-еквівалентного фантома виконані в [91-93]. В [92] за допомогою функції Гріна досліджується поширення вздовж плоского шкіро-еквівалентного фантома на частоті 60 ГГц у присутності тканин. Вплив тіла на антену показує зменшення посилення на 2-5 дБ. Ці результати показують, що збільшення товщини тканини в діапазоні 02-26 мм призводить до збільшення променевого посилення. Крім того, показано, що на показник спаду потужності не істотно впливає наявність тканин. У [93] показано, що узгодження імпедансу антени та посилення практично не залежать від наявності тіла, навіть коли відстань між антеною та тілом невелика. Вимірний питомий коефіцієнт поглинання (SAR) для антени, що розглядається, також показує, що рівень впливу на тіло нижче меж впливу, встановлених Міжнародною комісією із захисту від неіонізуючого випромінювання (ICNIRP), коли вхідна потужність для антени нижче 550 мВт. та зазор корпусу 1 мм. Антени, виготовлені з використанням тканини та струменевого друку, успішно працюють на міліметрових частотах з прийнятними характеристиками та ефективністю. В [94] була запропонована мікросмужкова антена-накладка 2×2 над масивом підкладок з бавовняної тканини на частоті 60 ГГц. Тканина була охарактеризована, щоб знайти відносну діелектричну проникність 2,0 та коефіцієнт втрат 0,02 [10].

Відповідно до вимог до розмірів дрібних елементів для випромінюючих елементів у решітці використовується мідна фольга товщиною 0,07 мм, а мінімальна ширина лінії мережі живлення становить 0,4 мм з допуском  $\pm 0,15$  мм. Втрати мікросмужкової лінії 50 Ом, виготовленої цим способом і надрукованої на текстильній підкладці товщиною 0,2 мм, склали 1,6 дБ/см [10].

Елементи антени були піддані мікрообробці з використанням лазера, що забезпечило геометричну точність приблизно 10 мкм. Масив продемонстрував велику смугу пропускання від 57 до 64 ГГц [10].

Антени Яги-Уда, надруковані на струменевому друку, описані в [95] на частоті 24,5 ГГц. У системі струменевого друку Dimatix DMP-2831 чорнило Cabot CCI-300 з наночастинками срібла використовувалося для друку металевих схем на гнучкому рідкокристалічному полімерному ламінаті. Різниця приблизно 2 дБ у реалізованому посиленні спостерігається на центральній частоті, поступово розширюючись по решті діапазону від 23 до 26 ГГц [10].

Ця різниця може бути пояснена складністю процесу багатошарового друку, яка має вирішальне значення для забезпечення рівномірної товщини підкладки, а також тонкості країв металевих схем. Аналогічний підхід із тканинною підкладкою ( $\epsilon_r = 2,5$ ,  $\tan \delta = 0,016$ ) був використаний для демонстрації друкованої антени Яги-Уда на частоті 60 ГГц для розповсюдження по тілу [14]. Для досягнення високої точності розмірів елементів мідна фольга була приклеєна до тканинної підкладки, бажані елементи були вирізані безпосередньо за допомогою лазерного верстата. З іншого боку тканини використовується повністю заземлена пластина, зроблена з тієї ж мідної фольги. Для цієї антени Яги-Уда було проведено фантомну характеристику, яка показала посилення 9,2 дБі та ефективність 48%. В [96] представлені антенні ґрати на частоті 26,5-40 ГГц на основі струменевого друку з тонкою срібною схемою 0,5 мкм з роздільною здатністю менше 20 мкм на підкладці LCP. На рисунку 1.11 показані пропоновані виготовлені міліметрові антени та двоелементні антенні решітки міліметрового діапазону [10,96].

Антени на полімерній основі, що використовують PDMS, у цьому випадку є складним завданням. Тонку мембрану PDMS використовували для створення мікросмужкової антеної решітки розміром  $4 \times 2$ . Мікросмужкова лінія 50 Ом використовувалася для характеристики PDMS для V-діапазону з  $\epsilon_r = 2,68$  та  $\tan \delta = 0,04$  [97]. Вимірювання показали внесені втрати близько 3 дБ/см, що суттєво обмежує довжину лінії передачі та необхідну масштабованість мережі

живлення. Антенні ґрати продемонстрували широкосмугові характеристики в діапазоні V (50-60 ГГц) з вимірним посиленням 12,3 дБі та ефективністю випромінювання 28% [10].

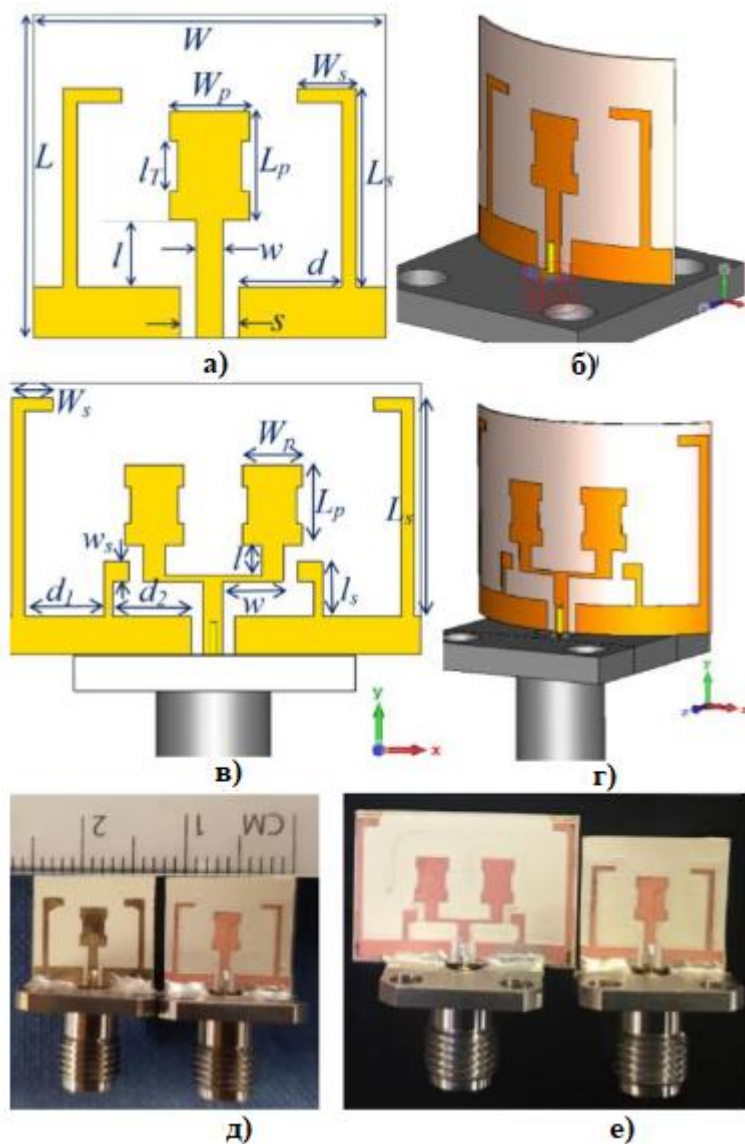


Рисунок 1.11 - Антена та антена решітки міліметрового діапазону виготовлені за допомогою лазерного фрезерування та струменевого друку на основі LCP. (а) Модель антени. (б) Конформна модель антени. (с) Модель антени решітки. (д) Конформна модель антени решітки. (е) Виготовлений прототип з лазерним травленням (праворуч) та струменевим друком (ліворуч). (ф) Виготовлена антена (праворуч) та двоелементні ґрати (ліворуч) [10,96]

Незважаючи на проблеми, PDMS має свої переваги для застосувань міліметрового діапазону, особливо через його сумісність із мікроактюаторами та

MEMS, де інтеграція антени може бути покращена, щоб уникнути довгих ліній передачі, що дозволяє уникнути зниження ефективності [10].

### 1.8 Фантоми, еквівалентні тканинам людини

Унікальне робоче середовище антен, тобто поблизу людського тіла, пред'являє додаткові вимоги на етапі проектування антен. Електромагнітний зв'язок між антеною та тканиною людського тіла з втратами впливає на характеристики антени, включаючи узгодження, резонансну частоту, ефективність та посилення [98,99]. До всього ж випромінювання антени несприятливо впливає на тканини людського тіла. Отже, існування людського тіла необхідно враховувати при моделюванні конструкції і, що найважливіше, при експериментальній перевірці придатної для носіння антени. На етапі моделювання звичайною практикою є моделювання антени у безпосередній близькості від однорідних або неоднорідних фантомних моделей. Потім це підтверджується шляхом вимірювання антени на тілі випробуваної людини або виготовлених гомогенних або гетерогенних фантомів, що імітують електричні властивості певних тканин людського тіла. Однією з проблем при розробці фантомів для тестування антен, що носяться, є той факт, що тканини людини являють собою складні багатошарові матеріали, що володіють широким діапазоном частотно-залежних електричних властивостей. Більше того, ці властивості змінюються з віком і змінюються від людини до людини [100–104].

Були зроблені значні зусилля щодо дослідження створення фантома, який імітує електричні властивості певних тканин тіла у певному діапазоні частот [105–108]. Вичерпний огляд розробки фантомів можна знайти в [108], де систематизовано різні категорії фантомів, їх переваги та недоліки, застосування, а також процес виготовлення [10].

Залежно від вмісту води у фантомі його можна розділити на дві основні групи: фантоми з низьким і високим вмістом води. Залежно від фізичної структури фантома його також можна розділити на чотири основні категорії: рідкі,



напіврідкі/гелеві, напівтверді/желеподібні та тверді. Представлені нові гнучкі матеріали для визначення характеристик тестованих антен (AUT) для імітації таких середовищ, як частини людського тіла (наприклад, руки, торс тощо) або голова, включаючи череп і мозок [10].

Основним компонентом перших трьох класів фантомів є вода. Отже, вони підходять для тканин людського тіла з вищою діелектричною проникністю, таких як м'язи та мозок. Приготування рідких фантомів є відносно простим, оскільки воно включає лише змішування складових матеріалів за рецептом (див. [109]). Проблема з таким фантомом полягає в його несумісних електричних властивостях, тобто відносну діелектричну проникність і провідність, в результаті зневоднення і псування матеріалів через зараження грибами [10].

Напіврідкі фантоми трохи твердіші, ніж рідкі фантоми, хоча все ще потребують контейнера, щоб утримувати форму. Також було виявлено, що цей клас фантомів є більш стійким у часі з точки зору електричних властивостей. Існує клас напівтвердих фантомів з ще міцнішою фізичною структурою, які можуть зберігати свою форму [110]. Ця характеристика робить цей клас підходящим варіантом для імітації реалістичного робочого середовища антен, тобто м'яких та багатошарових тканин тіла. Фантоми також можуть краще зберігати свої електричні властивості з часом. Однак, на відміну від фантомів перших двох класів, напівтверді фантоми зазвичай не можуть регулюватись і, отже, не можуть використовуватися повторно [10].

У твердих або сухих фантомах [106] основним матеріалом є керамічні матеріали, доступні в широкому діапазоні широкої діелектричної проникності з відносно низькими втратами. Останнє, зокрема, ставить завдання імітувати фактичний тангенс кута втрат та провідність багатьох типів тканин людського тіла. Інша проблема пов'язана з адгезивними матеріалами, які додаються в процесі виготовлення для видалення повітряних зазорів між сусідніми частинами керамічних фантомів. Ці включення цих адгезивних матеріалів ускладнюють різання або зміну форми фантомів. Проведення інвазивних вимірів із фантомами цього класу є проблематичним, враховуючи його фізичну структуру [10].

Однак тверді фантоми мають такі переваги як довговічність форми та стійкість електричних властивостей протягом дуже тривалого періоду часу. В [111] представлений динамічний твердотільний фантом. Цей фантом розроблений за допомогою манекена, приводу лінійного переміщення та шкірного еквівалента для оцінки ефективності доплерівського радара для виявлення дихання [112].

### 1.9 Перспективні напрямки подальших досліджень

У роботі наведені сучасні передові методи виробництва носимих антен в категоріях схемних антен на тканинній основі, антен з полімерним покриттям, мікрофлюїдних антен з інжекційними сплавами, а також антен для трафаретного друку та 3D-друку. Докладно обговорюється кожен метод і згадуються всі міркування щодо процесу виготовлення, використовуваних матеріалів і властивостей антени. Для будь-якої представленої техніки надається кілька прикладів як довідка. У таблицях розглянуті властивості використовуваного матеріалу, частоти та типи антен. На закінчення, всі технології виробництва та їх властивості зведені до Таблиці 1.6, щоб полегшити порівняння згаданих методів та допомогти вибрати правильний метод для застосування антени [10].

У зв'язку з зростаючим інтересом до носимих антен, особливо для додатків WBAN, деякі з найбільш важливих відкритих дослідницьких тем і прогнозованих майбутніх досліджень в цій галузі представлені наступним чином:

- Розробка методів вилучення параметрів тканин людини та моделей тіла на міліметрових та терагерцових частотах з метою розробки точних та практичних антен міліметрового діапазону.

Таблиця 1.6 - Порівняння властивостей представлених передових технологій виготовлення носимих антен [10]

Метод	Стійкість до вигинання	Стійкість до вологості	Вартість виготовлення	Простота виготовлення	Вага	Частота
Антени на тканинній основі із шиттям	Середня	Середня	Низька	Висока	Низька	87.5-5000 МГц 57-64 ГГц
Полімерні антени	Висока	Висока	Середня	Середня	Висока	383-5880 МГц
Мікрорідкісні антени з інжекційними металами	Висока	Висока	Висока	Низька	Середня	1.3-10МГц
Струменево надруковані антени	Середня	Низька	Низька	Низька	Низька	1.71-10.6 ГГц 57-64 ГГц

- Підвищення ефективності та точності існуючих технологій виробництва, особливо у високочастотних діапазонах.
- Удосконалення методів виготовлення мікроканалів в антенах з урахуванням інжекційних сплавів.
- Впровадження нових гнучких матеріалів для використання як основу з ширшим діапазоном діелектричної проникності для техніки вбудовування.

- Випуск на ринку нових струмопровідних тканин і ниток з вищою провідністю чи меншим питомим опором.
- Впровадження нових гнучких матеріалів, таких як графітові плівки [113] та графенові плівки (FGF) [114], як провідні частини антени з високою провідністю для техніки друку або нових пропонованих технологій виготовлення.

## 2 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ГНУЧКИХ ШИРОКОСМУГОВИХ АНТЕН

2.1 Сучасний стан теорії та практики гнучких широкосмугових антен для радіотехнологій доступу пристроїв мобільного зв'язку

Популярність систем мобільного зв'язку різко збільшилася протягом останнього десятиліття, і по ринковим вимогам вона продовжує зростати. В основній частині цих систем, антена є одним з найбільш важливих об'єктів проектування в сучасних мобільних пристроях зв'язку. Антенною є пристрій, який перетворює електромагнітну енергію в ньому в випромінює хвилю в необмеженому середовищі (наприклад: в повітряному середовищі) в режимі передачі і навпаки в режимі прийому. Оскільки антени залежать від частоти, вони проектується таким чином, щоб працювати в певних смугах [2].

Швидке зростання систем мобільного зв'язку змушував використовувати нові антени для базових і мобільних станцій (мобільного телефону, ноутбука, персонального цифрового помічника (Personal Digital Assistants - PDA), і т.д ..). Раніше мобільні системи були спроектовані для роботи на одній зі смуг частот 2G системи, пізніше з'явилися такі як Цифровий стільниковий система (Digital Cellular System - DCS), Служба персонального зв'язку (Personal Communications Service - PCS) і Глобальна система мобільного зв'язку (Global System for Mobile Communications - GSM) [2].

У теперішній час багато систем мобільного зв'язку використовують кілька смуг частот, наприклад GSM 900/1800/1900 смуги (890-960 МГц і 1710-1990 МГц); Універсальна система мобільного зв'язку (Universal Mobile Telecommunication Systems - UMTS) смуг (1885-2200 МГц); Доступ (Wireless Fidelity - Wi-Fi) / Бездротова локальна мережа (Wireless Local Area Networks - WLAN) смуги (2400-2484 МГц і 5150-5825 МГц); Міжнародна взаємодія для мікрохвильового доступу (Worldwide Interoperability for Microwave Access - WiMAX) смуг - (2.3 - 13.6) ГГц (частіше 2300 - 2500 МГц 2500 - 2690 МГц,

3300 - 3500 МГц і т.д.), був розроблений для організації єдиних бездротових мереж масштабу міста WMAN (Wireless Metropolitan Area Network). Список часто використовуваних смуг частот цих систем наведено в табл. 2.1 [2, 38].

Таблиця 2.1 – Використовувані смуги частот систем стільникового зв'язку [2]

Застосування бездротового зв'язку	Опис	Частотна смуга (МГц)
GSM 850	AMPS (Advanced Mobile Phone System)	824-894
GSM 900	GSM (Global System for Mobile Communications)	890-960
GSM 1800	DCS 1800	1710-1885
GSM 1900	PCS 1900; CDMA 1900 (Code Division Multiple Access)	1850-1990
UMTS	W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access); IMT 2000 (International Mobile Telecommunication)	1885-2200
Wi-Fi/WLAN (IEEE 802.11 b/g/n)	ISM 2450 (Industrial, Scientific and Medical)	2400-2484
Wi-Fi/WLAN (IEEE 802.11 y)		3650-3700
Wi-Fi/WLAN (IEEE 802.11 a/h/j)	HIPERLAN (High Performance Radio Local Area Network); U-NII (Unlicensed National; Information Infrastructure	5150-5825
WiMAX/WMAN (IEEE 802.16e)	Worldwide Interoperability for Microwave Access	2300-2500
WiMAX/WMAN (IEEE 802.16e)	Worldwide Interoperability for Microwave Access	2500-2690
WiMAX/WMAN (IEEE 802.16e)	Worldwide Interoperability for Microwave Access	3300-3500

## 2.2 Параметри та характеристики передавальних гнучких антен

Комплексна векторна характеристика спрямованості передавальної антени по електричному полю в дальній зоні, тобто на відстані  $r$  від неї, що задовольняє нерівності

$$r / \lambda \geq 2(a + b)^2 / \lambda^2, \quad (2.1)$$

де  $a$  й  $b$  - максимальні розміри передавальної й приймальної антен, відповідно,  $\lambda$  - довжина хвилі, у сферичній системі координат описується виразом

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) \vec{p}(\theta, \varphi) \exp[i\Phi(\theta, \varphi)] \quad (2.2)$$

У цьому виразі  $F(\theta, \varphi)$ ,  $\vec{p}(\theta, \varphi)$ ,  $\Phi(\theta, \varphi)$  - відповідно амплітудна, поляризаційна й фазова характеристики (діаграми) антени. Нерівність (2.1) отримано при максимально припустимих (у поперечному напрямку) фазових спотворень поля, рівних  $\pi/8$ .

Нормовані амплітудні ДН по напруженості поля й по потужності для антени лінійної поляризації визначаються співвідношеннями

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = E(\theta, \varphi) / E_{max}(\theta_1, \varphi_1) \quad (2.3)$$

$$\vec{F}^2(\theta, \varphi) = E^2(\theta, \varphi) / E_{max}^2(\theta_1, \varphi_1) \quad (2.4)$$

де  $E_{max}(\theta_1, \varphi_1)$  - значення амплітуди електричного поля в максимумі ДН;  $\theta_1, \varphi_1$  - кути, що відповідають максимумам випромінювання; риска над символом функції означає нормування.

Іноді нормовані ДН виражають у логарифмічному масштабі (у децибелах)

$$\vec{F}^2(\theta, \varphi) = 20 \lg \vec{F}(\theta, \varphi) = 10 \lg \vec{F}^2(\theta, \varphi) \quad (2.5)$$

Просторове зображення нормованих амплітудних ДН має вигляд замкнутих поверхонь. По кожній з кутових координат зазвичай розглядають два ортогональних перетини діаграми в так званих головних площинах, що проходять через її максимальне значення. Наприклад, якщо розглядають ДН як функцію від  $\theta$ , то в площинах  $\varphi = 0$  і  $\varphi = \pi/2$ . Перетин ДН головною площиною, що містить електричний вектор, називають ДН у площині  $E$ , а перетин головною площиною, що містить магнітний вектор, - ДН у площині  $H$ . Плоскі перетини нормованих амплітудних ДН зображують як у полярних, так і в прямокутних координатах, причому перший спосіб використовують переважно для побудови ДН слабконаправлених антен, а другий - гостронаправлених.

Із графічної побудови нормованих ДН визначають повну ширину  $2\theta_{0,5}$  головного пелюстка (променя) на рівні 0,5 по потужності (0,707 по полю або -3 дБ у логарифмічному масштабі), положення нулів, а також рівень бічних пелюстків  $\vec{F}_{q\max}$  і їх напрямку  $\theta_{q\max}$ , де  $q$  - номер бічного пелюстка.

Поляризація передавальної антени визначається поляризацією її поля випромінювання по електричному вектору. Найбільш загальним випадком поляризації є еліптична поляризація, що повністю описується такими параметрами поляризаційного еліпса:

- кутом  $\gamma_s$  нахилу великої осі еліпса до орта  $\vec{\theta}_0$  сферичної системи координат ( $0 < \gamma_s < \pi/2$ );
- коефіцієнтом еліптичності поляризації

$$K_s = b/a, \quad (2.6)$$

де  $b$  і  $a$  - мала й велика півосі еліпса ( $0 < K_s < 1$ );

- знаком поляризації  $signK_s$ , що вказує на напрямок обертання електричного вектора в площині еліпса:  $signK_s > 0$  для правої поляризації й  $signK_s < 0$  - для лівої.



При  $K_{\vartheta}=0$  еліпс вироджується в пряму лінію й поле має лінійну поляризацію; при  $K_{\vartheta}=\pm 1$  еліпс стає колом й поле має кругову поляризацію.

Параметри поляризаційного еліпса при відомих компонентах випромінюваного поля визначаються по формулах

$$\gamma_{\vartheta} = 0,5 \operatorname{arctg} \frac{2m \cos \psi}{1 - m^2}; \quad (2.7)$$

$$K_{\vartheta} = 2m \sin \psi / \left[ 1 + m^2 + \sqrt{(1 + m^2)^2 - (2m \sin \psi)^2} \right], \quad (2.8)$$

де  $m = E_{\varphi} / E_{\theta}$  - відношення амплітуд ортогональних компонентів,  $\psi = (\operatorname{arg} E_{\varphi} - \operatorname{arg} E_{\theta})$  - різниця фаз комплексних амплітуд цих компонентів. Зворотні залежності мають вигляд

$$m = \sqrt{(K_{\vartheta}^2 \operatorname{tg}^2 \gamma_{\vartheta} + 1) / (K_{\vartheta}^2 + \operatorname{tg}^2 \gamma_{\vartheta})}; \quad (2.9)$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \left\{ 2K_{\vartheta}^2 / [(1 - K_{\vartheta}^2) \sin 2\gamma_{\vartheta}] \right\}. \quad (2.10)$$

Залежність коефіцієнта еліптичності від кутових координат точки спостереження називають поляризаційною діаграмою антени.

Знання амплітудної й поляризаційної діаграм передавальної антени дозволяє визначити її КНД. Для антени лінійної поляризації КНД стосовно ізотропного випромінювача в напрямку максимуму ДН визначається виразом

$$D_0 = 4\pi / \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (2.11)$$

Для антени еліптичної поляризації при збігу максимумів парціальних ДН вираз для КНД має більше складний вигляд:

$$D_0 = D_{\theta 0} + D_{\varphi 0} , \quad (2.12)$$

де  $D_{\theta 0} = 4\pi / \left\{ \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \left[ \vec{F}_{\theta}^2(\theta, \varphi) + \vec{F}_{\varphi}^2(\theta, \varphi) / m^2 \right] \sin \theta d\theta d\varphi \right\}$  - парціальний КНД для

компонента поля  $E_{\theta}$ ,

$$D_{\varphi 0} = 4\pi / \left\{ \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \left[ m^2 \vec{F}_{\theta}^2(\theta, \varphi) + \vec{F}_{\varphi}^2(\theta, \varphi) \right] \sin \theta d\theta d\varphi \right\}$$
 - парціальний КНД для

компонента поля  $E_{\varphi}$ .

Тут  $\vec{F}_{\theta}(\theta, \varphi), \vec{F}_{\varphi}(\theta, \varphi)$  - нормовані амплітудні ДН взаємно ортогональних компонентів.

На практиці застосовують наближену оцінку КНД по формулі

$$D_0 \approx \frac{10}{2\theta_{0.5}^E 2\theta_{0.5}^H}, \quad (2.13)$$

де  $2\theta_{0.5}^E$  і  $2\theta_{0.5}^H$  - ширина ДН антени на рівні 0,5 по потужності в головних площинах у радіанах.

При розрахунку КНД дротової антени можна використовувати співвідношення

$$D_0 = \frac{\pi w}{R_{\Sigma_{ex}}} (l_{ef} / \lambda)^2 , \quad (2.14)$$

де  $l_{ef}$  і  $R_{\Sigma_{ex}}$  - ефективна (діюча) довжина й опір випромінювання, віднесені до входу антени;  $\lambda$  - довжина хвилі;  $w$  - хвильовий опір середовища (для вакууму  $w_0 = 120\pi$  Ом). ККД антени знаходиться як:

$$\eta = \frac{P_{\Sigma}}{P_{\Sigma} + P_{\Pi}} = \frac{R_{\Sigma_{ex}}}{R_{ex}} \quad (2.15)$$

де  $P_{\Sigma}$  - потужність випромінювання антени,  $P_{\Pi}$  - потужність втрат в антені;  
 $R_{ex} = R_{\Sigma_{ex}} + R_{\Pi}$  - активна частина вхідного опору антени,  $R_{\Sigma_{ex}}$  - опір випромінювання антени щодо її входу,  $R_{\Pi}$  - опір втрат в антені.

Коефіцієнт підсилення антени в напрямку максимуму ДН визначається по формулі

$$G_0 = \eta D_0 . \quad (2.16)$$

Діапазонні властивості антени характеризують або відношенням ширини смуги робочих частот  $\Delta f$  до середньої частоти діапазону і визначають у відсотках

$$\frac{\Delta f}{f_{cp}} = 2 \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{max} + f_{min}} 100\% \quad (2.17)$$

де  $f_{min}$ ,  $f_{max}$  - максимальна й мінімальна частоти робочого діапазону антени, або коефіцієнт перекриття діапазону

$$K_n = f_{max} / f_{min} \quad (2.18)$$

### 2.3 Параметри та характеристики приймальних гнучких антен

По теоремі взаємності прийомну антену характеризують ті ж параметри, що й передавальну. ЕДС, що наводиться (збуджувальна) у прийомній антені полем електромагнітної хвилі, може бути знайдена по формулі Неймана

$$\varepsilon = El_{ef} \vec{F}(\theta, \varphi) \cos \chi, \quad (2.19)$$

у якій

$$l_{ef} = \lambda \sqrt{\frac{G_0 R_{ex}}{\pi W}} = \lambda \sqrt{\frac{D_0 R_{\Sigma ex}}{\pi W}} \quad (2.20)$$

У цих формулах:  $E$  - напруженість поля діючої на антену хвилі;  $l_{ef}$  - ефективна довжина антени;  $\vec{F}(\theta, \varphi)$  - нормована амплітудна ДН антени;  $\chi$  - кут між площинами поляризації прийомної антени й вхідної хвилі;  $\lambda$  - довжина хвилі;  $G_0$  - коефіцієнт підсилення антени в напрямку максимуму ДН;  $R_{ex}$  - активна складова вхідного опору антени;  $D_0$  - КНД антени в напрямку максимуму ДН;  $R_{\Sigma ex}$  - опір випромінювання антени щодо її входу. Максимальна ЕДС у прийомній антені буде, коли  $\vec{F}(\theta, \varphi) \cos \chi = 1$ .

Максимально можлива потужність (у ватах), що віддається прийомною антенною із вхідним опором  $Z_{ex} = R_{ex} + iX_{ex}$  у погоджене навантаження (приймач)  $Z_n = R_n + iX_n$ , безпосередньо підключену до антени, має місце при  $R_{ex} = R_n$ ,  $X_{ex} = -X_n$  і визначається по формулі

$$P_{max} = \varepsilon_{max}^2 / 8R_{ex}. \quad (2.21)$$

Потужність, що віддається прийомною антенною в неузгоджене навантаження ( $R_{ex} \neq R_n$ ,  $X_{ex} \neq -X_n$ ), розраховується по формулі

$$P = \gamma P_{max} = \frac{4R_{ex}R_n}{(R_{ex} + R_n)^2 (X_{ex} + X_n)^2} P_{max}, \quad (2.22)$$

де  $\gamma$  - коефіцієнт узгодження антени з навантаженням (коефіцієнт передачі по потужності).

Потужність, що прийомна антена віддає в навантаження у випадку, коли вхідний опір антени чисто активний й дорівнює хвильовому опору фідера  $Z_{ex} = R_{ex} = W_{\phi}$ , а навантаження не погоджене з фідером  $Z_n \neq W_{\phi}$ , знаходиться як

$$P = (1 - |\Gamma|^2) P_{max} \quad (2.23)$$

де  $\Gamma$  - коефіцієнт відбиття від навантаження.

Формули (2.21) - (2.23) втрати не враховують. Щоб їх урахувати, необхідно праві частини формул помножити на ККД.

Ефективна площа (у квадратних метрах) прийомної антени з рахуванням втрат визначається виразом

$$S_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_0 \quad (2.24)$$

Для лінійних антен ефективна площа вводиться чисто формально й пропорційна квадрату ефективної довжини

$$S_{ef} = \frac{w}{4R_{\Sigma}} l_{ef}^2, \quad (2.25)$$

де  $w$  - хвильовий опір середовища,  $R_{\Sigma}$  - опір випромінювання антени.

Власна шумова температура прийомної антени (у градусах Кельвіна) визначається по формулі

$$T_{AT} = T_0(1 - \eta), \quad (2.26)$$

де  $T_0$  - температура навколишнього середовища, °К.

Максимальна потужність корисного сигналу  $P_{np}$  на виході прийомної антени, що знаходиться в далекій зоні щодо передавальної антени, розраховується по формулі ідеальної радіопередачі

$$P_{np} = \frac{P_{nep} G_{nep} G_{np} \lambda^2}{(4\pi r)^2}, \quad (2.27)$$

де  $P_{nep}$  - потужність випромінювання передавальної антени;  $G_{nep}$ ,  $G_{np}$  - коефіцієнти підсилення передавальної й приймальної антен;  $\lambda$  - довжина хвилі;  $r$  - відстань між антенами.

#### 2.4 Елементи гнучких широкодіапазонних антен

До елементів гнучких широкодіапазонних антен відносяться такі електронно малі випромінювачі: елементарний електричний вібратор (диполь Герца), елементарна рамка, елементарна щілина (магнітний диполь Герца) та елементарна площа (елемент Гюйгенса).

Комплексні амплітуди електричного (у вольтах на метр) та магнітного (в амперах на метр) полів в дальній зоні елементарного електричного вібратора, який знаходиться в однорідному ізотропному середовищі з хвильовим опором  $w$ , знаходяться за формулами

$$E_{\theta} = i \frac{w I_0 k l}{4\pi r} \bar{F}(\theta) \exp(-ikr); \quad (2.28)$$

$$\dot{H} = \dot{E}_{\theta} / w, \quad (2.29)$$

де  $w$  - хвильовий опір середовища;  $k = 2\pi/\lambda$  - хвильове число,  $\lambda$  - довжина хвилі;  $I_0 = const$  - амплітуда струму у вібраторі;  $l$  - довжина вібратора;  $r$  - відстань від вібратора до точки спостереження;  $\bar{F}(\theta) = \sin(\theta)$  - нормована амплітуда ДН

вібратора в площині, що проходить через вісь вібратора (площина  $E$ );  $\theta$  - кут між віссю вібратора и напрямком до точки спостереження.

Опір випромінювання елементарно електричного вібратора визначається за формулою

$$R_{\Sigma} = \frac{2}{3} \pi w \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2, \text{ Ом} \quad (2.30)$$

Комплексні амплітуди електричного і магнітного полів в дальній зоні елементарної електричної рамки, яка знаходиться в однорідному ізотропному середовищі з хвильовим опором  $w$ , розраховуються за формулами

$$E_{\varphi} = \frac{w I_0 k^2 S_p}{4 \pi r} \bar{F}(\theta) \exp(-ikr); \quad (2.31)$$

$$\dot{H}_{\theta} = -\dot{E}_{\varphi} / w, \quad (2.32)$$

де  $\bar{F}(\theta) = \sin(\theta)$ ;  $S_p$  - площа рамки.

Комплексні амплітуди електричного і магнітного полів в дальній зоні елементарної односторонньої щілини в екрані, що знаходиться в однорідному ізотропному середовищі з хвильовим опором  $w$ , дорівнюють

$$E_{\varphi} = -i \frac{E_{щ} k l b}{2 \pi r} \bar{F}(\theta) \exp(-ikr); \quad (2.33)$$

$$\dot{H}_{\theta} = -\dot{E}_{\varphi} / w, \quad (2.34)$$

де  $\bar{F}(\theta) = \sin(\theta)$ ;  $E_{щ} = U_{щ} / b$  - напруженість електричного поля в щілині,  $U_{щ} = const$  - напруженість в точках живлення щілини;  $l, b$  - довжина і ширина щілини відповідно.

Провідність випромінювання елементарної односторонньої щілини знаходиться як

$$G_{\Sigma} = \frac{8\pi}{3w} \left( \frac{l}{\lambda} \right)^2, \text{См.} \quad (5.35)$$

Комплексні амплітуди електричного і магнітного полів в дальній зоні елемента Гюйгенса в однорідному ізотропному середовищі з хвильовим опором  $w$  знаходяться за формулами

$$\dot{E}_{\theta} = -i \frac{E_0 k S}{2\pi r} \bar{F}(\theta) \sin \varphi \exp(-ikr); \quad (2.36)$$

$$\dot{E}_{\varphi} = -i \frac{E_0 k S}{2\pi r} \bar{F}(\theta) \cos \varphi \exp(-ikr); \quad (2.37)$$

$$\dot{H}_{\theta} = -\dot{E}_{\varphi} / w; \quad (2.38)$$

$$\dot{H}_{\varphi} = -\dot{E}_{\theta} / w, \quad (2.39)$$

де  $E_0 = \text{const}$  - амплітуда напруженості електричного поля на поверхні елемента;  $S$  - площа елемента;  $\bar{F}(\theta) = 0,5(1 + \cos \theta)$  - нормована амплітуда ДН в площині  $E(\varphi=0)$  та  $H(\varphi=\pi/2)$ .

В силу лінійності рівнянь Максвела електромагнітне поле системи (решітки) випромінювачів являє собою суму полів її окремих елементів. Якщо ці елементи мають однакові розміри, однакові амплітудно – фазові розподіли збуджуваного поля чи струму і орієнтовані в просторі однаковим чином, то сумарна ДН може бути записана у вигляді добутку векторної комплексної ДН одного елемента  $\bar{F}_{el}(\theta, \varphi)$  на скалярний множник направленості  $f_{\Sigma}(\theta, \varphi)$ , представляє собою діаграми направленості системи точкових ізотропних випромінювачів, розташованих у фазових центрах елементів системи (вузлах решітки), тобто

$$\bar{F}_{\Sigma}(\theta, \varphi) = \bar{F}_{el}(\theta, \varphi) \cdot f_{\Sigma}(\theta, \varphi). \quad (2.40)$$



### 3 РОЗРОБЛЕННЯ ГНУЧКОЇ ШИРОКОСМУГОВОЇ АНТЕНИ

#### 3.1 Електричний розрахунок гнучкої вкороченої симетричної вібраторної антени

Друкована технологія виготовлення забезпечує мінімальні вагові, габаритні та вартісні характеристики антен. В даний час досить добре освоєно технологію багат шарового друку. Необхідні характеристики мобільного телефону забезпечують багат шарові широко смугові вкорочені симетричні вібраторні антени. При проектуванні таких випромінювачів бажано мати передавальні числа, що дозволяють зробити оцінний розрахунок характеристик та параметричну оптимізацію конструкції [2].

Нині існують різні методи розрахунку широко смугових антен. Однак більшість цих методів не дозволяють оцінити характеристики спрямованості широко смугових або багатосмугових антен через математичну складність. Тому виникає необхідність розробки наближених методів розрахунку, що застосовуються для широкого класу антен і дозволяють з мінімальними витратами часу і з достатнім ступенем точності оцінити основні характеристики. Для якісного розрахунку характеристик вкороченої симетричної вібраторної антени необхідно визначити параметри неоднорідної лінії, відкритої на кінці (рис. 3.1) [2].

Для приблизного розрахунку характеристик вкороченої симетричної вібраторної антени необхідно визначити параметри нерівномірної лінії, відкритої на кінці [2]

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U} = \frac{U_2 \left( -\frac{b}{2} + \sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} \right)}{2\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}} e^{\frac{b}{2}x} \left( e^{-x\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}} + e^{x\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}} \right), \\ \dot{j} = \frac{U_2\gamma}{2\rho_0\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}} e^{-\frac{b}{2}x} \left( e^{x\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}} - e^{-x\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}} \right), \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де  $x$  — відстань даної точки лінії від її кінця,  $\dot{U}, \dot{J}$  — значення комплексних амплітуд напруги та струму на будь-якій ділянці лінії відповідно,  $\gamma$  — коефіцієнт поширення [2]

$$\gamma = Y_1 Z_1, \quad (3.2)$$

$Y_1$  є лінійною комплексною провідністю;  $Z_1$  - комплексний опір симетричної лінії;  $\rho$  характеристичний опір лінії [2]

$$\rho = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}}. \quad (3.3)$$

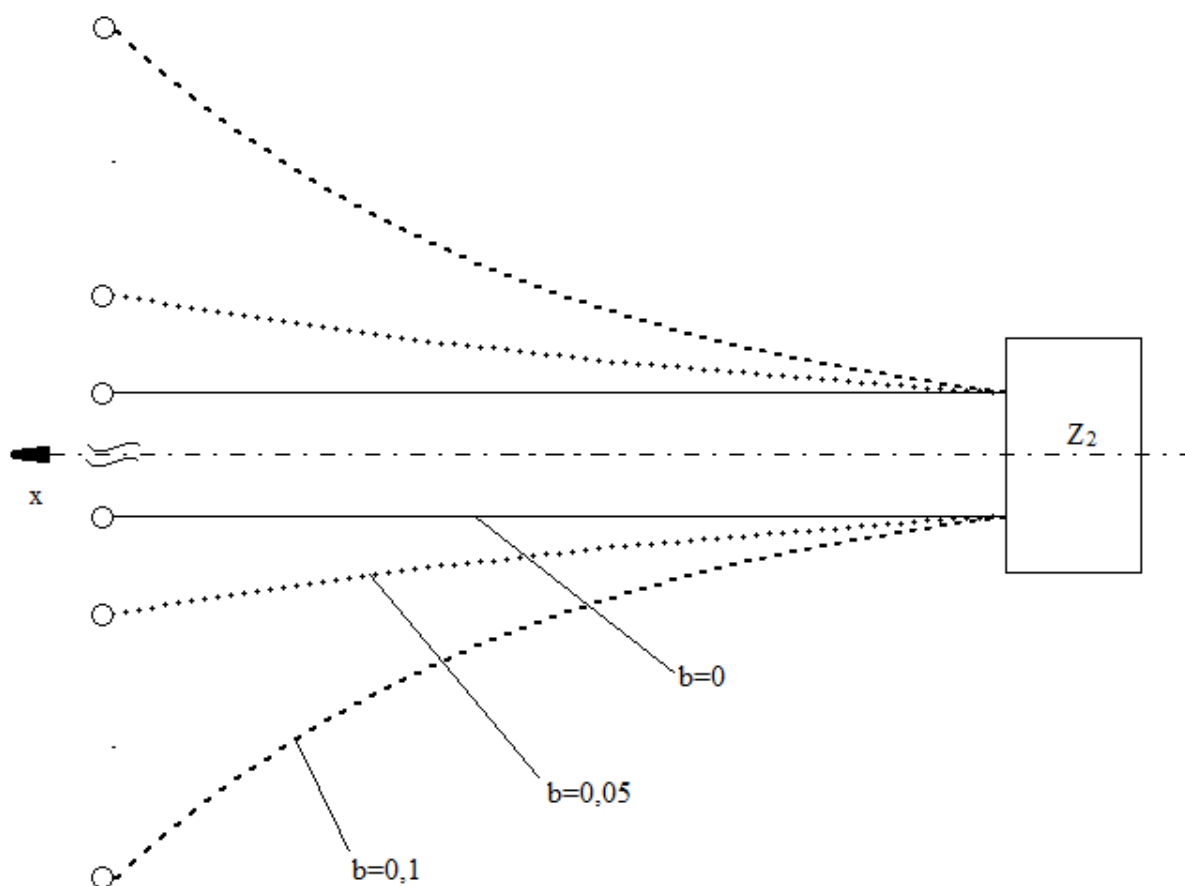


Рисунок 3.1 - Еквівалентна двопровідна експоненціальна лінія  $\rho = \rho_0 e^{bx}$ : суцільна лінія – однорідна, переривчаста та пунктирна – відповідно неоднорідна лінія з різним законом зміни хвильового опору [2]

У випадку, коли характеристичний імпеданс змінюється експоненціально

$$\rho = \rho_0 e^{bx}, \quad (3.4)$$

де  $\rho_0$  – характеристичний опір на кінці лінії, а коефіцієнт поширення хвилі  $\gamma$  є незмінною уздовж цієї лінії.

З рівняння (3.1) випливає, що коефіцієнт поширення в експоненційній лінії визначається таким чином [2]

$$\gamma' = \gamma \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2}. \quad (3.5)$$

У загальному випадку, коефіцієнт поширення є комплексною [2]

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (3.6)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт згасання,  $\beta$  - коефіцієнт фази.

При малих втратах можна вважати, що коефіцієнт поширення приблизно дорівнює [2]

$$\gamma \approx \alpha + jm, \quad (3.7)$$

де

$$\alpha' = \alpha \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2}, \quad m' = m \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2}. \quad (3.8)$$

Втрати на випромінювання визначаються за виразом [2]

$$\alpha_{\Sigma}(x) = \frac{R_{\Sigma_1}}{2\rho(x)} = \frac{R_{\Sigma_1}}{2\rho_0 e^{bx}}, \quad (3.9)$$

д  $R_{\Sigma_1}(x)$  – погонний опір випромінювання на одиницю довжини лінії.

Загальний опір випромінювання експоненціальної лінії пов'язаний з лінійним опором випромінювання таким співвідношенням [2]

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{J_2} \int_0^l J^2(x) R_{\Sigma_1}(x) dx = \frac{\gamma R_{\Sigma_1}}{\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}} \int_0^l \left( e^{x\left(\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} - b\right)} - e^{-x\left(\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} + b\right)} \right) dx. \quad (3.10)$$

Експоненційний опір випромінювання лінії [2]

$$R_{\Sigma} = \frac{R_{\Sigma_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2}} \left( \frac{e^{l\left(\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} - b\right)}}{\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} - b} - \frac{e^{-l\left(\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} + b\right)}}{\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} + b} \right). \quad (3.11)$$

Лінійна опір випромінювання лінії [2]

$$R_{\Sigma_1}(x) = \frac{R_{\Sigma} \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \left( \gamma^2 - \frac{3b^2}{4} \right)}{\left( \sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} + b \right) e^{l\left(\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} - b\right)} - \left( \sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} - b \right) e^{-l\left(\sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} + b\right)}}. \quad (3.12)$$

Константа поширення хвилі в експоненційній лінії з втратами на випромінювання визначається виразом [2]

$$\gamma' = \frac{R_{\Sigma} \left( \gamma^2 - \frac{b^2}{2} \left( 1 - \frac{3b^2}{4} \right) \right)}{2\rho_0 e^{bl} \left( \left( \sqrt{\gamma^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2} + b \right) e^{l \left( \sqrt{\gamma^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2} - b \right)} - \left( \sqrt{\gamma^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2} - b \right) e^{-l \left( \sqrt{\gamma^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2} + b \right)} \right)} + jm \sqrt{1 + \left( \frac{b}{2\gamma} \right)^2}, \quad (3.13)$$

де коефіцієнт загасання визначається виразом [2]

$$\alpha' = \frac{R_{\Sigma} \left( \gamma^2 - \frac{b^2}{2} \left( 1 - \frac{3b^2}{4} \right) \right)}{2\rho_0 e^{bl} \left( \left( \sqrt{\gamma^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2} + b \right) e^{l \left( \sqrt{\gamma^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2} - b \right)} - \left( \sqrt{\gamma^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2} - b \right) e^{-l \left( \sqrt{\gamma^2 + \left( \frac{b}{2} \right)^2} + b \right)} \right)}, \quad (3.14)$$

а коефіцієнт фази визначається виразом [2]

$$m' = jm \sqrt{1 + \left( \frac{b}{2\gamma} \right)^2}. \quad (3.15)$$

Розподіл напруги та струму в експоненційній випромінюючій лінії [2]

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{U} &= \frac{U_2 \left( -\frac{b}{2} + \alpha' + jm \sqrt{1 + \left( \frac{b}{2m} \right)^2} \right)}{2 \left( \alpha' + jm \sqrt{1 + \left( \frac{b}{2m} \right)^2} \right)} e^{-\frac{b}{2}x} \left( e^{-x \left( \alpha' + jm \sqrt{1 + \left( \frac{b}{2m} \right)^2} \right)} + e^{x \left( \alpha' + jm \sqrt{1 + \left( \frac{b}{2m} \right)^2} \right)} \right), \\ \dot{J} &= \frac{jU_2 m}{2\rho_0 \left( \alpha' + jm \sqrt{1 + \left( \frac{b}{2m} \right)^2} \right)} e^{-\frac{b}{2}x} \left( e^{x \left( \alpha' + jm \sqrt{1 + \left( \frac{b}{2m} \right)^2} \right)} - e^{-x \left( \alpha' + jm \sqrt{1 + \left( \frac{b}{2m} \right)^2} \right)} \right). \end{aligned} \right. \quad (3.16)$$

Вхідний опір на довільній ділянці лінії визначається як відношення напруги до струму [2]

$$Z = \frac{-j2\rho_0 \left( -\frac{b}{2} + \alpha' + jm\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \right) e^{bx} \left( e^{-x \left( \alpha' + jm\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \right)} + e^{x \left( \alpha' + jm\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \right)} \right)}{m \left( e^{x \left( \alpha' + jm\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \right)} - e^{-x \left( \alpha' + jm\sqrt{1 + \left(\frac{b}{2\gamma}\right)^2} \right)} \right)}. \quad (3.17)$$

Для поля, яке створюється всією поверхнею антени в площині E, напруженість електричного поля [2]

$$E_\theta = -j \frac{E_0}{2r\lambda} \left( 1 + \frac{Z}{Z_0} \cos \theta \right) \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} e^{-j\beta(r-y\sin\theta)} dx dy. \quad (3.18)$$

Інтегруючи та замінюючи експоненціальні функції тригонометричними, отримуємо [2]

$$E = E_\theta = -j \frac{E_0}{2r\lambda} e^{-j\beta r} \left( 1 + \frac{Z}{Z_0} \cos \theta \right) a \frac{\sin \left( \frac{\beta b}{2} \sin \theta \right)}{\frac{\beta}{2} \sin \theta}. \quad (3.19)$$

Аналогічно вираз для діаграми спрямованості в площині H ( $XOZ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ )

$$E = E_\varphi = -j \frac{E_0}{2r\lambda} e^{-j\beta r} \left( \cos \theta + \frac{Z}{Z_0} \right) b \frac{\sin \left( \frac{\beta a}{2} \sin \theta \right)}{\frac{\beta}{2} \sin \theta}. \quad (3.20)$$

### 3.2 Синтез параметрів гнучкої широкосмугової антени для нижнього діапазону робочої смуги частот

Задача синтезу (визначення конструктивних параметрів по заданим електричним) для директорних антен до теперішнього часу не вирішена, тому її вирішують методом перебору. Частіше всього користуються чисельними методами оптимізації, що реалізуються за допомогою ЕОМ.

Процес розрахунку будується слідуєчим чином. За вибраними значеннями вільних параметрів (так званому початковому приближенні) вирішується задача аналізу і визначається показник якості. Після цього вільні параметри змінюються таким чином, щоб відбулось покращення показника якості. Ця процедура повинна виконуватись до тих пір, поки покращення показника якості на кожному етапі не стане менше деякої наперед заданої величини. В подібних розрахунках можуть бути використані стандартні методи чисельної оптимізації певної функції багатьох змінних: метод простого перебору, градієнтний метод схилу, метод Монте-Карло, нелінійне програмування і т. д.

Для розрахунку даної антени використаємо персональний комп'ютер, зокрема пакет програм HFSS ANYS, яка дозволяє розрахувати антену даного типу, отримати основні її параметри та характеристики: діаграму спрямованості, коефіцієнт підсилення, коефіцієнт стоячої хвилі, коефіцієнт спрямованої дії, вхідний опір антени. Крім того, дана програма має режим оптимізації, за допомогою якого можливо отримати кращі параметри антени.

При проектуванні даної антени слід мати на увазі таке:

1. в першому приближенні коефіцієнт спрямованої дії (КСД) не залежить від числа директорів, але залежить від лінійного розміра (довжини) антени;
2. смуга пропускання (діапазон частот, в якому КСД змінюється не більше, ніж на 3 дБ) в першому приближенні збільшується з ростом числа директорів при постійній довжині антени;
3. КСД може бути збільшений, а рівень бокових пелюсток зменшений, якщо до кінця антени довжини вібраторів зменшувати а відстань між ними збі-

льшувати;

4. хвилевий опір росте (а значить зменшується необхідна величина його подовження чи вкорочення) із зменшенням його діаметра;

5. для забезпечення необхідної ширини смуги пропускання, мінімальних спотворень форми діаграми спрямованості, а також вимог узгодження з трактом необхідно вибирати певну форму активного вібратора і схему його живлення;

Вихідними даними для проектування гнучкої широкосмугової антени є кінцеві результати попередніх розрахунків.

Значення центральної частоти нижньої робочої смуги частот становить

$$f_{ц} = (f_{\max} + f_{\min})/2 \text{ [МГц]};$$

$$f_{ц} = (850+800)/2 = 825 \text{ (МГц)};$$

тобто довжина хвилі на середній частоті становить

$$\lambda = c / f_{ц} \text{ [м]}. \quad (3.21)$$

За формулою (3.21)

$$\lambda_{\text{н}} = \frac{3 \cdot 10^8}{850 \cdot 10^6} = 35,3 \text{ (мм)},$$

$$\lambda_{\text{ц}} = \frac{3 \cdot 10^8}{825 \cdot 10^6} = 36,4 \text{ (мм)},$$

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{3 \cdot 10^8}{800 \cdot 10^6} = 37,5 \text{ (мм)}.$$

Передбачається, що розподілення струму в вібраторі описується рівнянням

$$I(Z) = \dot{I} \cdot \sin[k(1-|Z|)], \quad (3.22)$$



де  $\dot{I}$  – комплексна амплітуда струму в пучності;  $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$  – хвильове число;  $l$  – довжина плеча вібратора;  $Z$  – поточна координата.

Опір між  $i$ -м та  $j$ -м вібраторами визначається по формулі

$$\dot{Z}_{ij} = \frac{i \cdot 60}{\sin kl_i \cdot \sin kl_j} \int_0^{l_j} \sin[k(l_j - Z)] \times \left\{ \frac{\exp\left[-ik\sqrt{d_{ij}^2 + (l_j - Z)^2}\right]}{\sqrt{d_{ij}^2 + (l_j - Z)^2}} + \frac{\exp\left[-ik\sqrt{d_{ij}^2 + (l_j + Z)^2}\right]}{\sqrt{d_{ij}^2 + (l_j + Z)^2}} - 2\cos kl_i \frac{\exp\left[-ik\sqrt{d_{ij}^2 + Z^2}\right]}{\sqrt{d_{ij}^2 + Z^2}} \right\} dZ \quad (3.23)$$

де  $d_{ij}$  – відстань між вібраторами.

Теоретично розрахована діаграма спрямованості антени

В площині E

$$F(\theta^E) = \sum_{n=1}^N I_n \frac{\cos(kl_n \cos \theta^E) - \cos kl_n}{(1 - \cos kl_n) \cdot \sin \theta^E}, \quad (3.24)$$

де  $\theta$  – кут між віссю антени і напрямленням в точку спостереження, рад;  $N$  – повне число вібраторів,  $k$  – хвильове число.

В площині H

$$F(\theta^H) = \sum_{n=1}^N I_n \exp(ikd_n \cos(\theta^H)). \quad (3.25)$$

Для живлення вібратора використаємо симетруючий пристрій. Для того, щоб вібратор мав чисто активний опір проведемо його вкорочення. Вкорочення вібратора можна розрахувати за формулою

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{23,3}{\ln\left(\frac{\lambda_c}{2 \cdot r_6}\right) - 1}, \quad (3.26)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{23,3}{\ln\left(\frac{418}{4}\right) - 1} = 6,3\%.$$

З формули (10)  $\Delta l$  запишемо у вигляді

$$\Delta l = l \cdot 0,063 [\text{мм}],$$

$$\Delta l = 87,78 \cdot 0,063 = 5,53 (\text{мм}).$$

Отже,

$$l = 87,78 - 5,53 = 82,25 (\text{мм}).$$

Розіб'ємо активний вібратор на дві половини, які рознесені між собою на відстань  $d$ , яка вибирається з умови  $d \ll \lambda_{\text{СЕР}}$ . Приймаємо

$$d = 0,05 \cdot \lambda_{\text{СЕР}} = 0,05 \cdot 418 = 20,9 \text{ мм}$$

Визначаємо довжину хвилі у фідері

$$\lambda_F = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon}} [\text{мм}], \quad (3.27)$$

де  $\varepsilon = 2$  - відносна діелектрична проникність діелектрика фідера.

$$\lambda_F = \frac{418}{\sqrt{2}} = 295,5 (\text{мм}).$$

Враховуючи симетрію плеч активного вібратора відносно  $U$  – коліна на його зовнішній поверхні можуть наводитися вібратором лише протифазні струми. Так як  $d \ll \lambda_{CEP}$ , то поля випромінювання цих струмів компенсують один одного, що видаляє антенний ефект фідера.

Нехай  $l_1 = 0$  мм, а хвильовий опір фідера  $R_F = 50$  Ом, тоді  $l_2 = \lambda_{CEP} / 2 = 209$  мм.

Знайдемо хвильовий опір трансформатора (розрахунки проводимо для середньої довжини хвилі робочого діапазону)

$$\rho_{TP} = \sqrt{R_A * R_F}, [\text{Ом}] \quad (3.28)$$

де  $R_F$  - хвильовий опір фідера, Ом;

$R_A$  - опір антени ( після оптимізації становить 23,3 Ом).

Підставимо чисельні значення та отримуємо

$$\rho_{TP} = \sqrt{23.3 \cdot 50} = 41.5 \text{ (Ом)}.$$

Приймаємо  $\rho_{TP} = 50$  Ом (паралельне з'єднання опорів лінії 50 Ом), тоді в точці з'єднання  $U$  – коліна та коаксіального кабелю вхідний опір становить

$$Z_H = \frac{Z_{TP}^2}{Z_A} \quad (3.29)$$

$$Z_H = \frac{50^2}{23.3} = 107.3 \text{ (Ом)}.$$

Знаходимо коефіцієнт стійкої хвилі

$$K_{CTU} = \frac{Z_H}{Z_F}, \quad (3.30)$$

де  $Z_F$  - хвильовий опір (50 Ом).

$$K_{CTU} = \frac{107.3}{50} = 2.146$$

Розрахуємо коефіцієнт спрямованої дії за формулою

$$D = K_1 \frac{L}{\lambda}, \quad (3.31)$$

де  $L$  - довжина антени від рефлектора до останнього директора ( $L = 361.82$ ),  
 $K_1$  - коефіцієнт, який залежить від довжини антени і найчастіше лежить в межах 3-9, і знаходиться за графіком (приймемо  $K_1 = 3$ ).

$$D = 3 \frac{361.82}{418} = 2.6 \text{ (рази)}.$$

### 3.3 Комп'ютерне проектування гнучкої широкосмугової друкованої антени

На практиці розміри випромінювачів і відстані між ними зазвичай підбираються експериментальним шляхом. Скористаємось програмою HFSS ANSYS. За допомогою даної програми можна здійснити синтез гнучкої антени, дослідити її параметри та характеристики, а також досягнути оптимальних параметрів, які б задовольняли ТЗ.

На рис. 3.2 наведена модель гнучкої широкосмугової друкованої антени в

HFSS ANSYS. Модель параметрична, тому можна змінювати геометричні розміри. Хоча результати моделювання і досі не відповідають результатам ТЗ ра-  
дує, що КСВ має прийнятні значення (рис. 3.3).

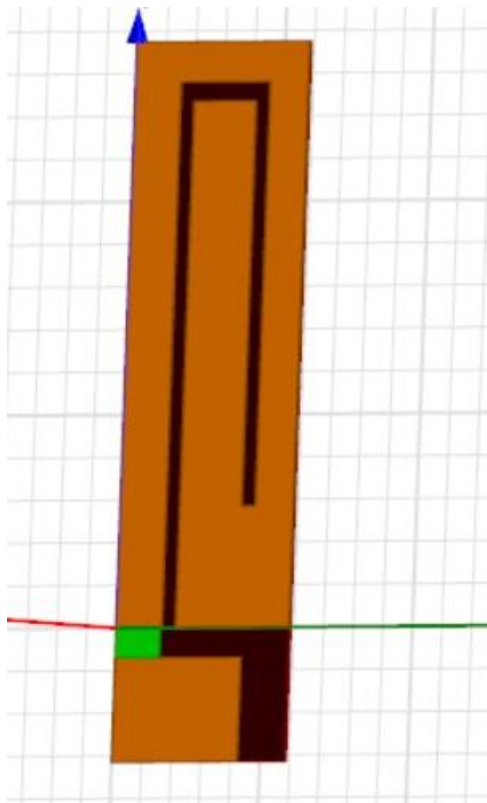


Рисунок 3.2 – Модель гнучкої широкопсмгової друкованої антени в ANSYS

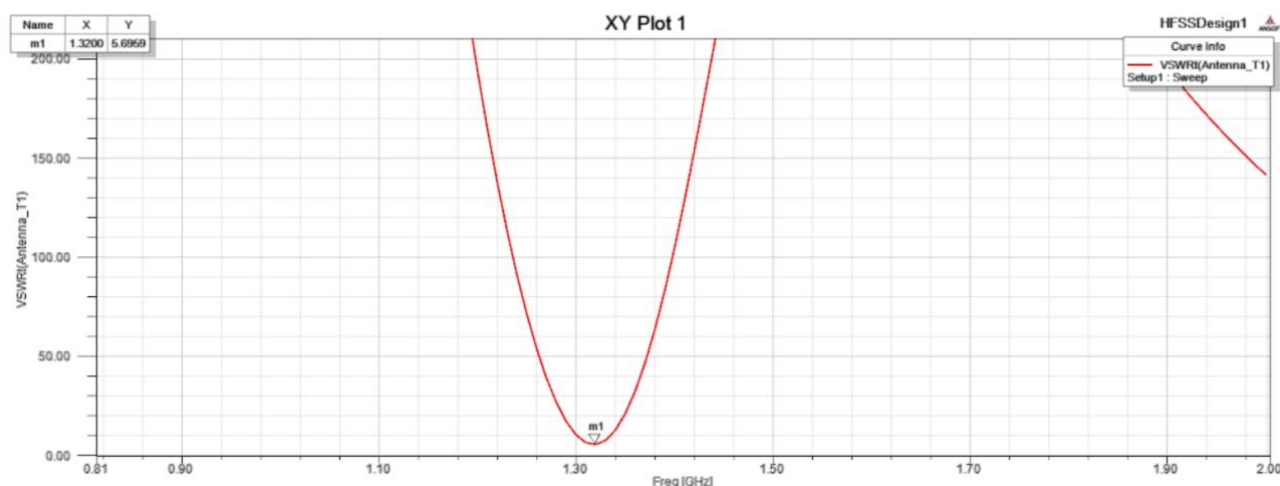


Рисунок 3.3 – Графік коефіцієнта стоячої хвилі широкопсмгової друкованої антени

Для оптимізації процесу збудження і регулювання параметрів гнучкої широкопсмгової друкованої було досліджено розподіл поверхневих струмів провідності по площині антени. На рис. 3.4 наведено діаграму розподілу

струмів провідності збудження по поверхні гнучкої широкопasmової друкованої антени.

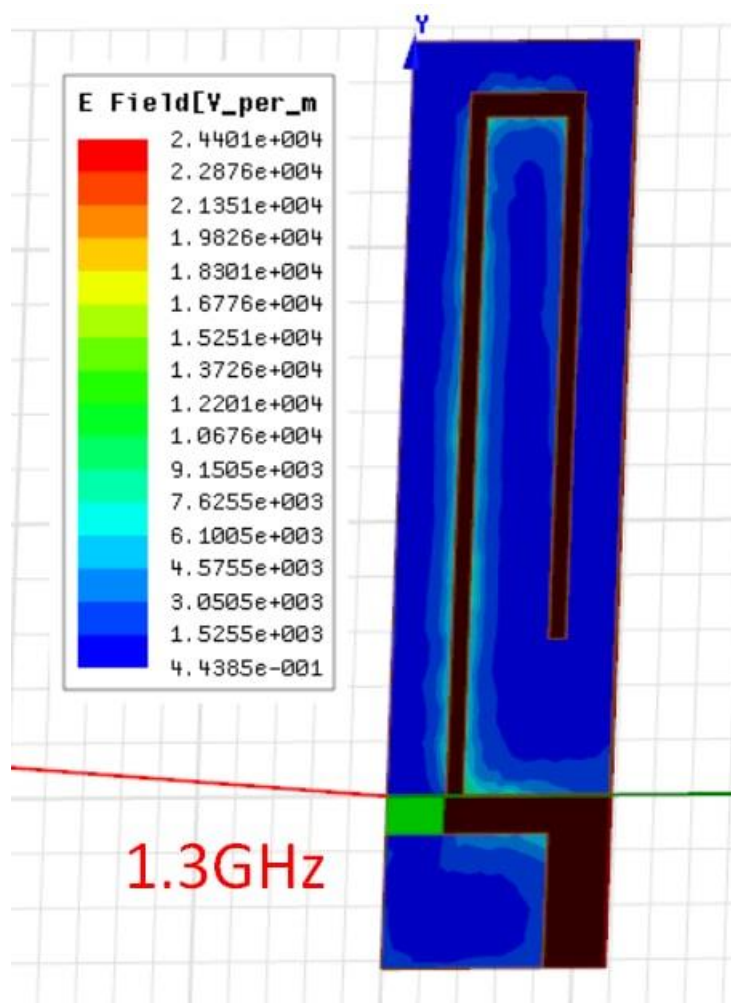


Рисунок 3.4 – Діаграма розподілу струмів провідності збудження по поверхні гнучкої широкопasmової друкованої антени

Задання параметрів для оптимізації режиму живлення у точці збудження гнучкої широкопasmової друкованої антени наведено на рис. 3.5. Результат моделювання частотної характеристики КСХ гнучкої антени наведений на рис. 3.6.

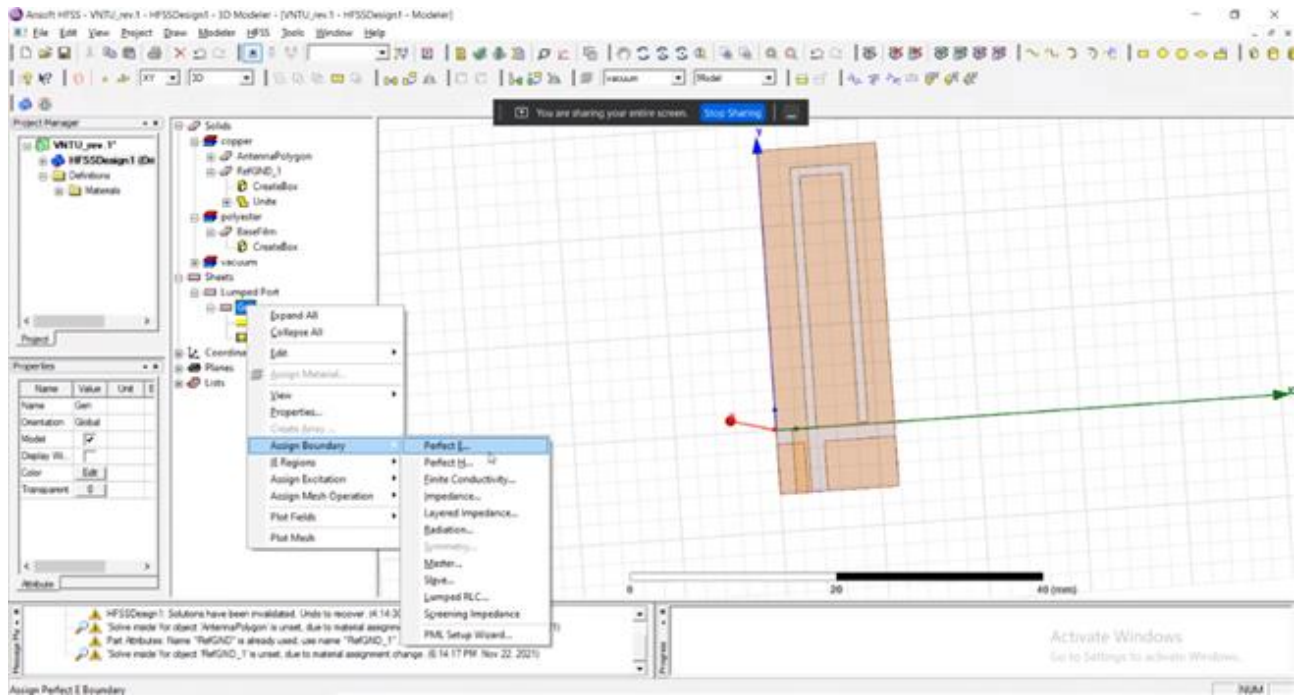


Рисунок 3.5 - Задання параметрів для оптимізації режиму живлення у точці збудження гнучкої широкопугової друкованої антени

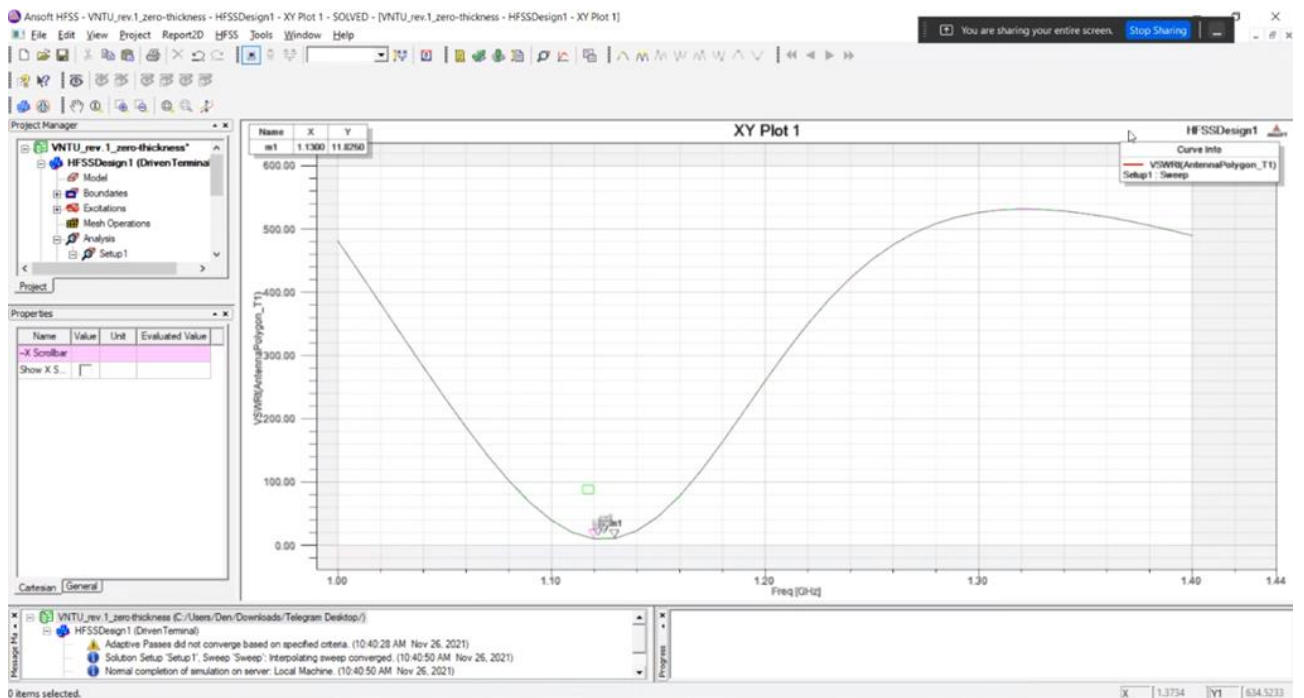


Рисунок 3.6 – Результат моделювання частотної характеристики КСХ гнучкої широкопугової друкованої антени

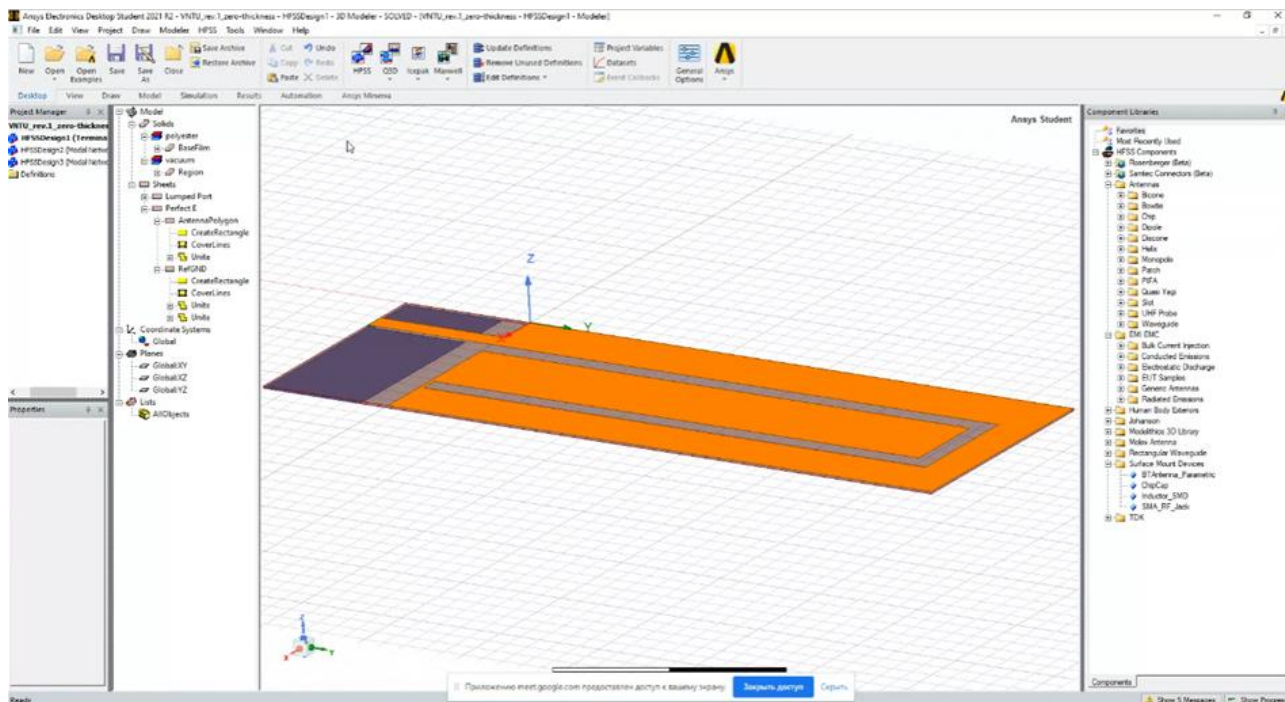


Рисунок 3.7 – Уточнення геометричних розмірів гнучкої широкосмугової друкованої антени для досягнення заданого у ТЗ рівня КСХ

У результаті оптимізації були розраховані геометричні розміри гнучкої широкосмугової друкованої антени. На рис. 3.8 наведене креслення гнучкої широкосмугової друкованої антени.

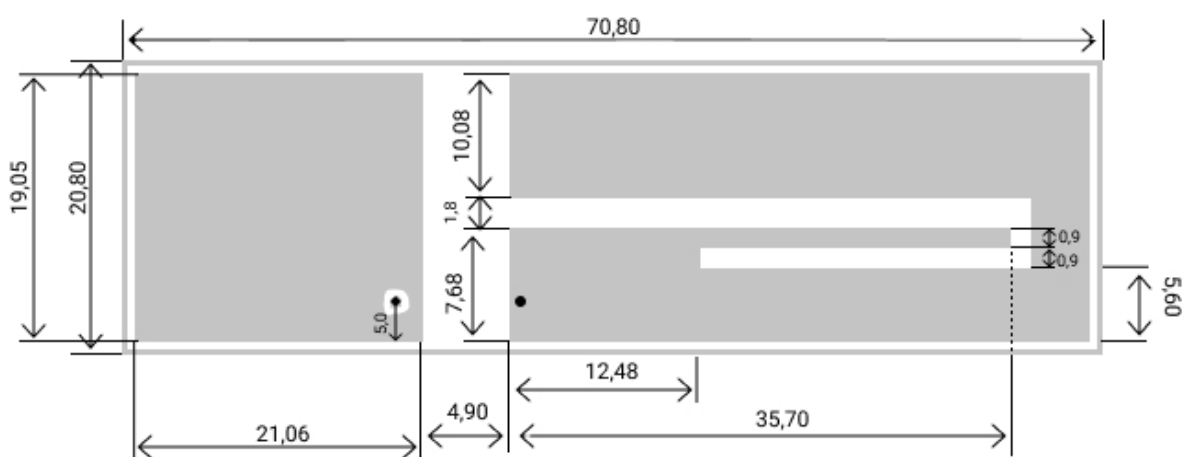


Рисунок 3.8 - Креслення гнучкої широкосмугової друкованої антени



### 3.4 Комп'ютерне моделювання спрямованих властивостей гнучкої ширококутної друкованої антени

Комп'ютерне моделювання спрямованих властивостей гнучкої ширококутної друкованої антени проведено за допомогою програми HFSS ANSYS. Результати моделювання наведено на рис. 1.9 – рис. 3.12.

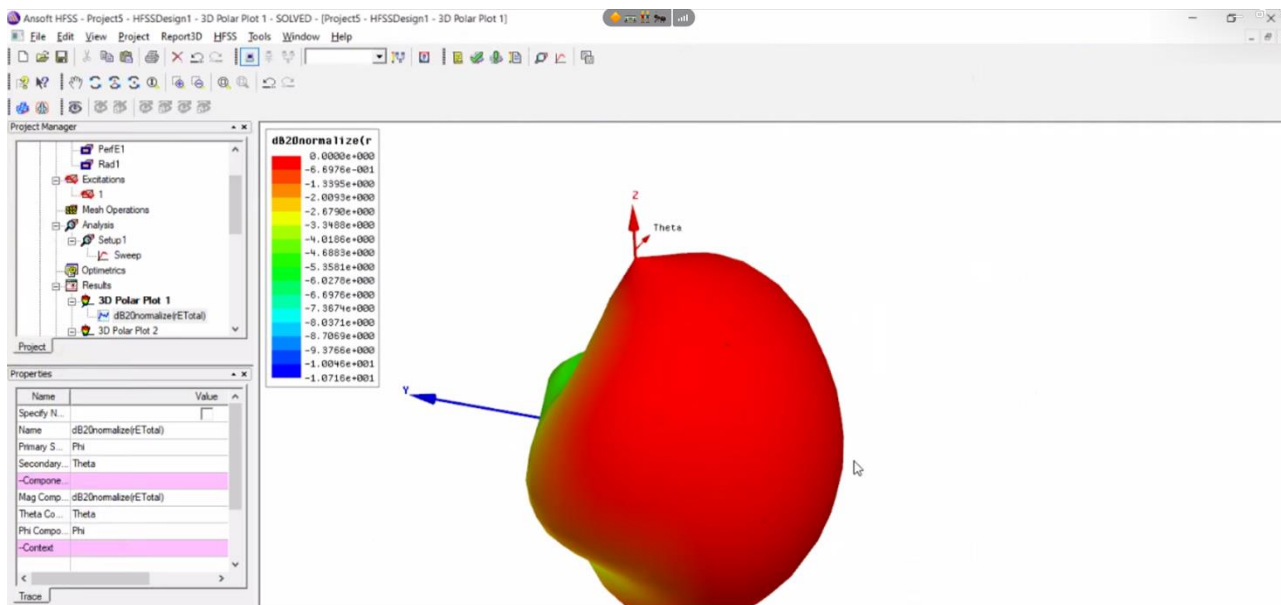


Рисунок 3.9 – Простора діаграма спрямованості гнучкої ширококутної друкованої антени

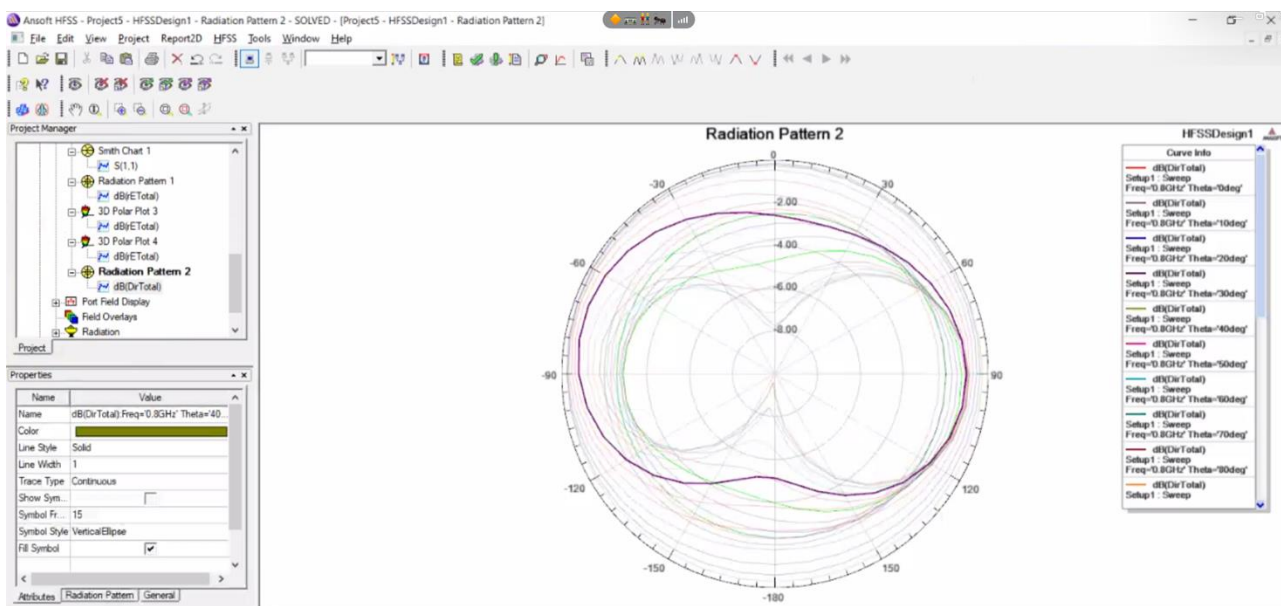


Рисунок 3.10 – Діаграма спрямованості гнучкої ширококутної друкованої антени у вертикальній площині

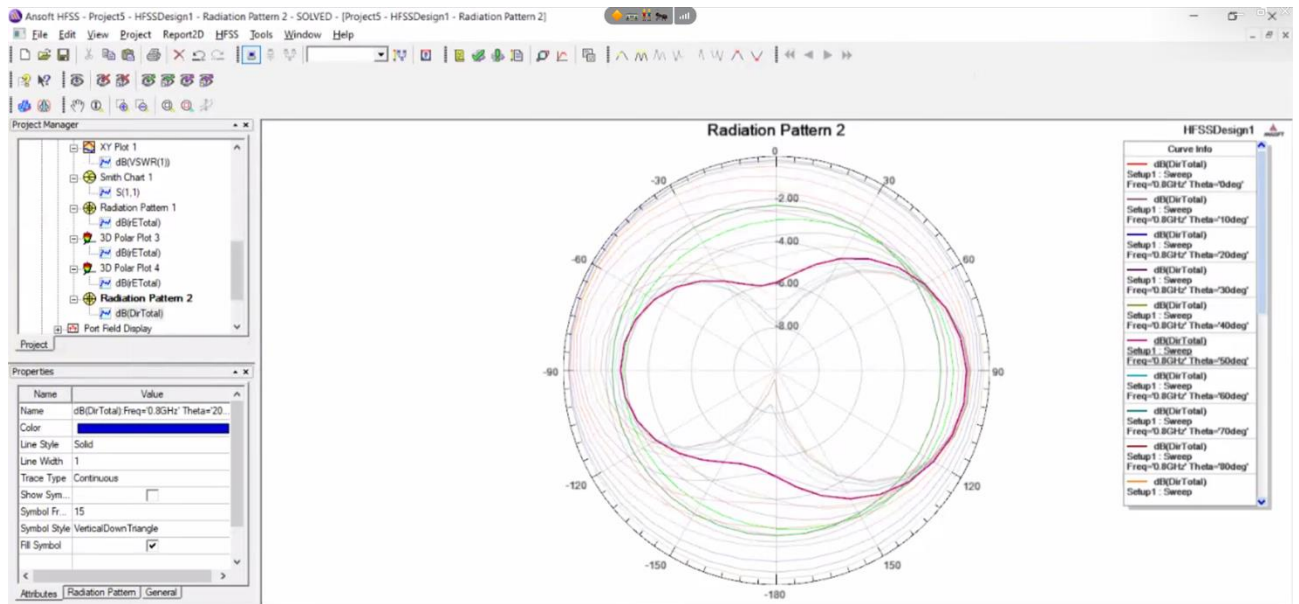


Рисунок 3.11 – Діаграма спрямованості гнучкої ширококугової друкованої антени в горизонтальній площині

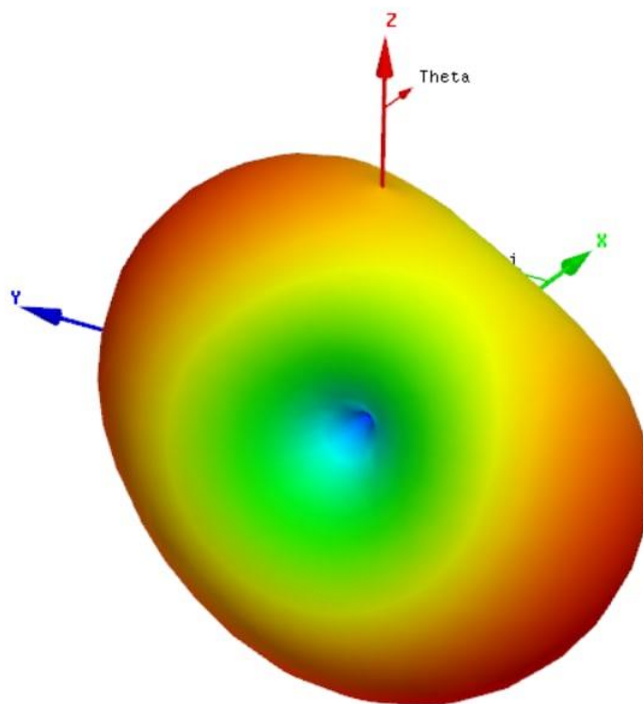


Рисунок 3.12 – 3-D зображення просторової діаграми спрямованості гнучкої ширококугової друкованої антени

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГНУЧКОЇ ШИРОКОСМУГОВОЇ ДРУКОВАНОЇ АНТЕНИ

Результати експериментальних досліджень гнучкої широкосмугової друкованої антени були отримані з використанням обладнання лабораторії 1306 кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету.

На рис. 4.1 наведено фото експериментального зразка гнучкої широкосмугової друкованої антени. Геометричні розміри розробленого експериментального зразка гнучкої широкосмугової друкованої антени повністю відповідають кресленню на рис. 3.8.

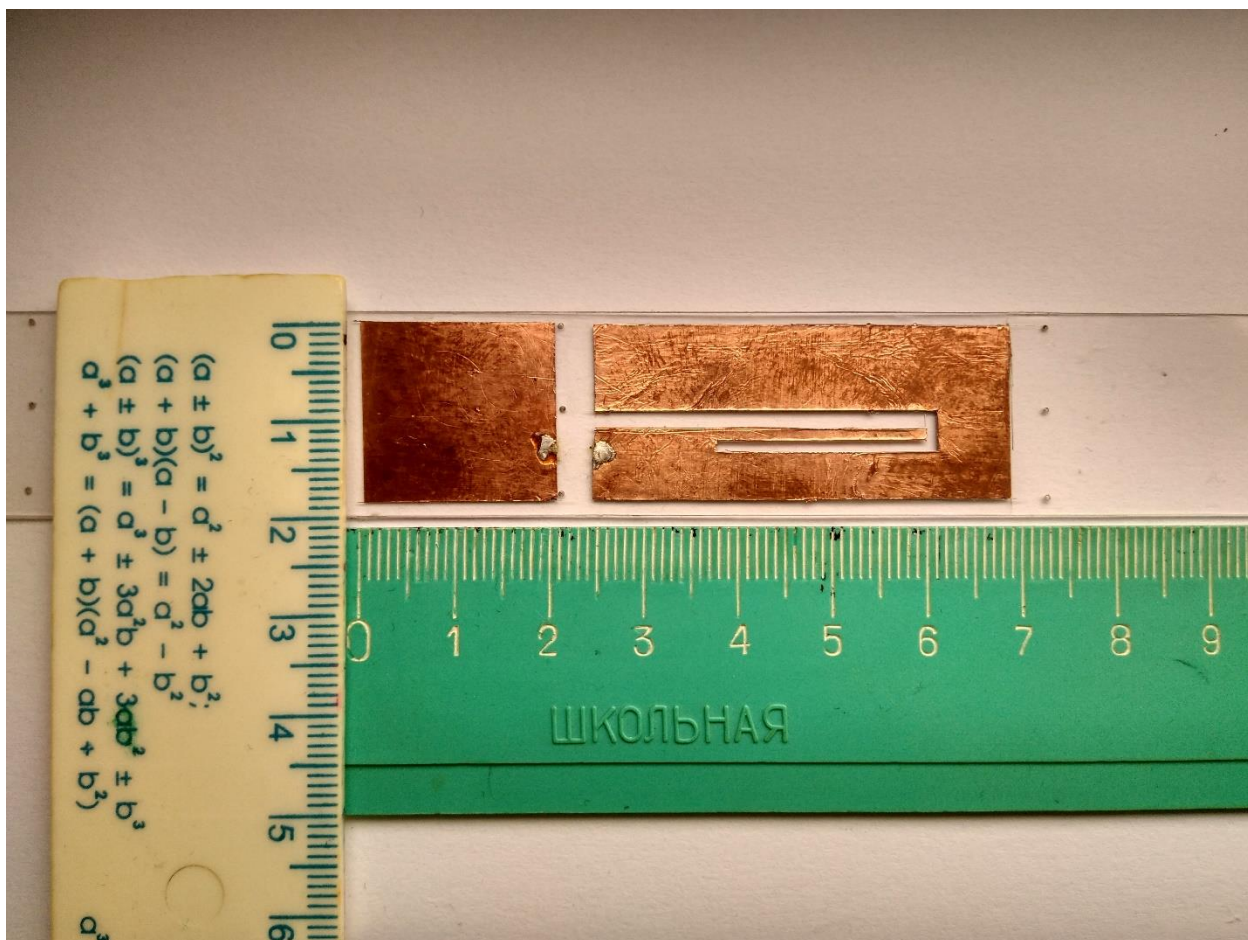


Рисунок 4.1 – Фото експериментального зразка гнучкої широкосмугової друкованої антени

Для проведення експериментальних досліджень був використаний сучасний цифровий вимірювальний прилад Agilent Technologies E7495B 10 Mhz - 2.7GHz Base Station Test Set фото якого наведені на рис. 4.2.



a)



б)

Рисунок 4.2 – Фото цифрового вимірювального приладу Agilent Technologies E7495B 10 Mhz - 2.7GHz Base Station Test Set: фронтальний вигляд (а) і вигляд згори (б)

Результати експериментальних досліджень наведені на рис. 4.3 – рис. 4.6.

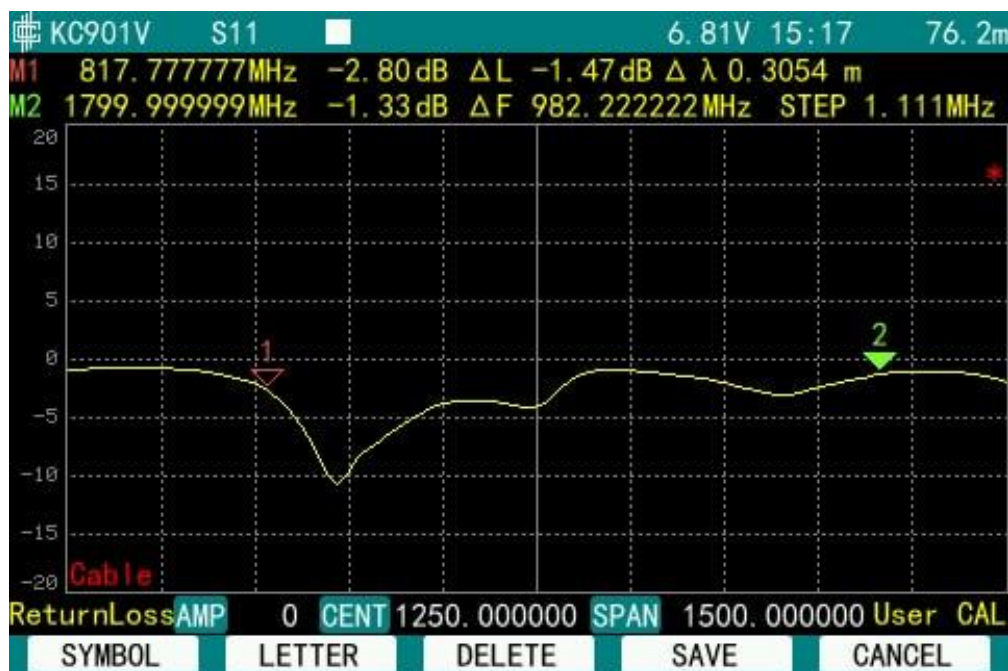


Рисунок 4.3 – Результати експериментальних досліджень зворотних втрат (Return Loss, dB) при розташуванні гнучкої антени у повітрі на віддалі

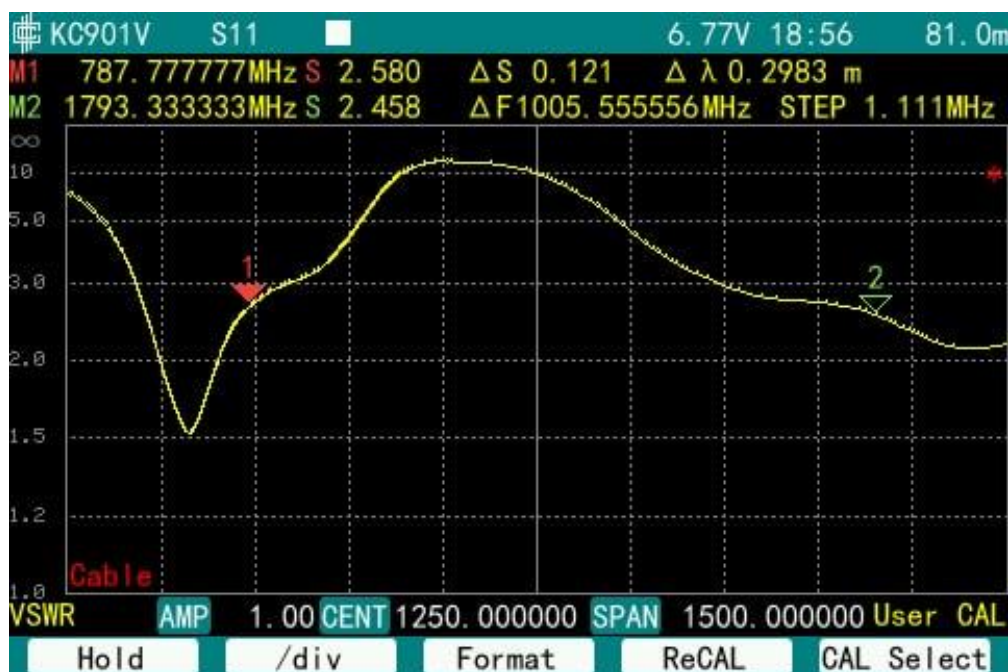


Рисунок 4.4 – Результати експериментальних досліджень КСХ (VSWR) при розташуванні гнучкої антени у повітрі біля руки



Рисунок 4.5 – Результати експериментальних досліджень КСХ (VSWR) при розташуванні гнучкої антени у повітрі на віддалі

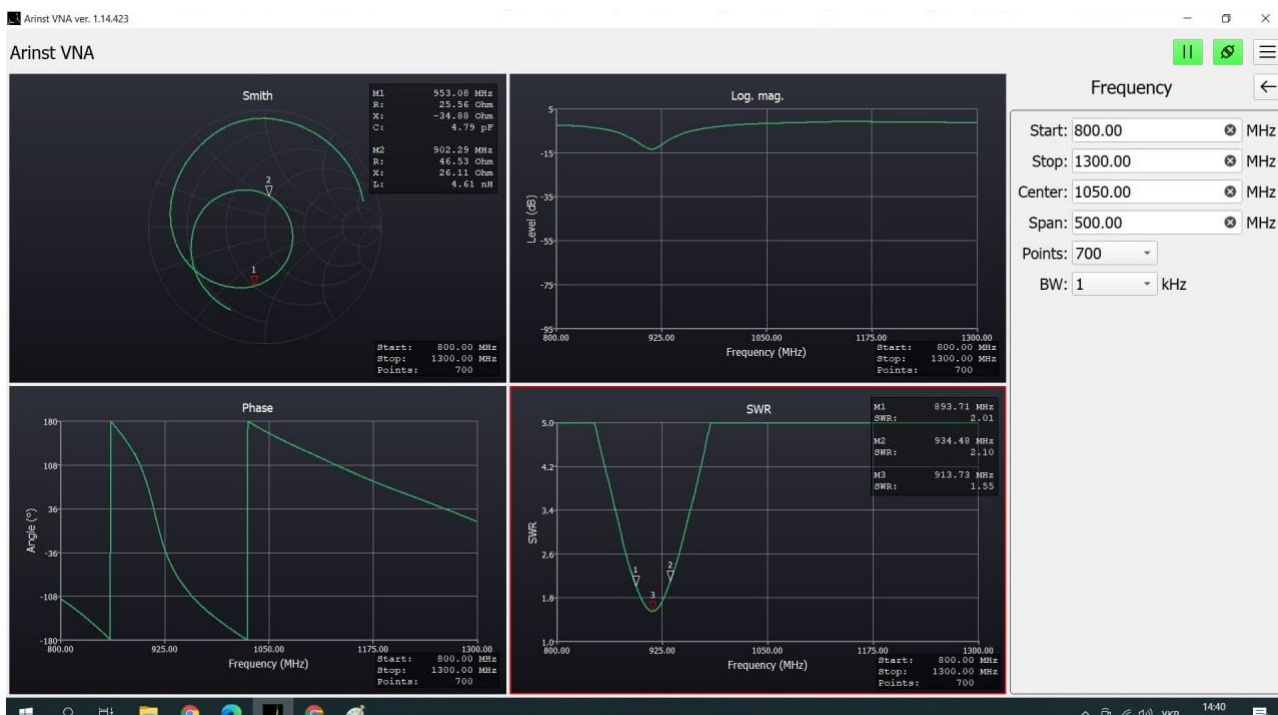


Рисунок 4.6 – Результати експериментальних досліджень гнучкої широкопasmової друкованої антени з використанням векторного аналізатора

## 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 за темою «Гнучка широкопугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж» 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 «Гнучка широкопугова антена для радіотехнологій доступу носимих

пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж» 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 [115].

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
<b>Технічна здійсненність концепції</b>					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
<b>Ринкові переваги (недоліки)</b>					
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
<b>Ринкові перспективи</b>					
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
<b>Практична здійсненність</b>					



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 на-	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 відсутні	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 комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні дешеві та дорогі матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
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 5.2.

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	4	4	5
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	2	2	2
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	4	4	4
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)	3	3	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	36	37	38
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	37,0		

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 [115].

Таблиця 5.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів $СБ_c$ , 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 «Гнучка широкопугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж» становить 37,0 бала, що, відповідно до таблиці 5.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

## 5.2 Оцінювання рівня новизни розробки

Виводячи на ринок новинку виробник вважає, що тієї новизни, якою наділена нова розробка є достатньо для того, щоб вона була сприйнята споживачем як нова. Але це не завжди так, в силу того, що споживач і виробник неоднозначно визначають її рівень новизни. Тому доцільним є визначення рівня новизни розробки отриманої в результаті досліджень за темою «Гнучка широкопугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж».

Саме визначення рівня і ступеня інтегральної новизни є найбільш актуальним, оскільки її рівень визначає ступінь однакового позитивного сприйняття новизни розробки як виробником, так і споживачем, а отже і ринком в цілому, а це, у свою чергу, є гарантією того, що новинка знайде своє місце на ринку, користуватиметься попитом у споживачів і забезпечить відшкодування витрат, зазначених товаровиробником під час розроблення та виробництва технічної розробки [116].

Рівень новизни нової продукції розраховуємо експертним методом шляхом протиставлення нової продукції та її аналогів, що існують в даний час на ринку, за чинниками що визначають її значення, в системі «краще-гірше». Рівень новизни встановлюємо відносно рівня аналога (або продукту, що досить близький до аналога).

Для визначення  $i$ -го виду новизни, застосуємо чинники, які впливають на її рівень. Кожен чинник  $i$ -го виду новизни розраховуємо в балах. Більша кількість набраних балів свідчить про більший рівень новизни. Для оцінювання рі-

вня новизни використаємо думки експертів, які встановлюють визначені бали відповідним чинникам. Бал відповідності проставляється в діапазоні від (-5 – значно гірше аналога до +5 – значно краще аналога). Результати попереднього оцінювання зведемо до відповідного листа оцінювання (таблиця 5.4).

Таблиця 5.4 – Лист оцінювання рівня новизни експертами

Види та чинники		Бали та експерти		
		Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3
<i>I</i>		2	3	4
Споживча новизна	Питома вага 0,225	Максимальний бал $B_i$		25
		<i>MAX</i>		
1. Зміна поведінкових звичок споживача		3	3	3
2. Ступінь задоволення потреб і запитів		2	2	2
3. Спосіб задоволення потреби		2	2	2
4. Формування нової потреби		0	0	0
5. Формування нового споживача		0	0	0
Середній бал експертів $B_{i\text{ омп}}$		7		
Товарна новизна	Питома вага 0,217	Максимальний бал $B_i$		30
		<i>MAX</i>		
1. Параметричні зміни показників продукції				
1.1. Якісні		3	3	3
1.2. Технічні		3	4	3
1.3. Економічні		2	3	2
1.4. Сервісні		4	4	4
2. Якість продукції по відношенню до конкурентів		3	3	3
3. Функціональні зміни		3	3	3
Середній бал експертів $B_{i\text{ омп}}$		19		
Виробнича новизна	Питома вага 0,042	Максимальний бал $B_i$		25
		<i>MAX</i>		
1. Рівень унікальності товару для підприємства		5	5	5
2. Рівень унікальності для галузі		2	3	2
3. Рівень унікальності товару для країни		0	0	0
4. Зміна виробничої системи		4	4	4
5. Відносно існуючого асортименту		2	2	2
Середній бал експертів $B_{i\text{ омп}}$		13		
Прогресивна новизна	Питома вага 0,179	Максимальний бал $B_i$		25
		<i>MAX</i>		

## Продовження таблиці 5.4

1. Зміна технології виготовлення		4	4	4
2. Рівень застосування нових компонентів і матеріалів		1	2	1
3. Зміна технологічного принципу дії виробу		1	2	1
4. Зміна конструктивного виконання		3	2	3
5. Рівень застосування інновацій		2	2	2
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		11		
Ринкова новизна	Питома вага 0,12	Максимальний бал $B_i$ <i>MAX</i>		20
1. Новий виріб на новому ринку		0	0	0
2. Новий виріб на відомому ринку		1	1	1
3. Модернізований виріб		2	2	2
4. Нова модель		1	2	2
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		5		
Екологічна новизна	Питома вага 0,035	Максимальний бал $B_i$ <i>MAX</i>		20
1. Рівень екологічної чистоти технології виробництва		4	4	2
2. Рівень впровадження мало- та безвідходних технологій		4	4	3
3. Рівень екологічно небезпечних режимів експлуатації продукції		5	5	5
4. Рівень забруднення навколишнього середовища		0	0	0
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		12		
Соціальна новизна	Питома вага 0,036	Максимальний бал $B_i$ <i>MAX</i>		20
1. Використання нового товару приводить до покращення стану здоров'я нації		0	0	0
2. Використання нового товару приводить до зростання доходів населення		0	0	0
3. Виробництво нового товару приводить до збільшення (зменшення) кількості робочих місць на підприємстві		4	5	4
4. Виробництво нового товару приводить до підвищення кваліфікації персоналу		3	3	3
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		7		
Маркетингова новизна	Питома вага 0,146	Максимальний бал $B_i$ <i>MAX</i>		20

Продовження таблиці 5.4

1. Нові методи маркетингових досліджень	0	0	0
2. Вживання нових стратегій сегментації ринку	1	1	1
3. Вибір нової маркетингової стратегії обхвату і розвитку цільового сегмента	2	3	2
4. Побудова нових каналів збуту	2	2	2
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$	5		

Значення  $i$ -го виду новизни розрахуємо за формулою [116]

$$I_i = \frac{B_{i\ oмп}}{B_{i\ MAX}}, \quad (5.1)$$

де  $B_{i\ oмп}$  – отримана кількість балів за шкалою оцінок чинників, що визначають  $i$ -й вид новизни;

$B_{i\ MAX}$  – максимальна кількість балів, що може бути отримана за  $i$ -м видом новизни.

Загальний рівень інтегральної новизни розраховуємо шляхом перемноження отриманого значення  $i$ -го виду новизни на її вагомість, причому вагомість  $i$ -го виду новизни визначаємо експертним методом, за формулою [116]

$$N_{инт} = \sum_i^n W_i \cdot I_i, \quad (5.2)$$

де  $N_{инт}$  – рівень інтегральної (сукупної) новизни;

$W_i$  – вагомість (питома вага)  $i$ -го виду новизни;

$n$  – загальна кількість видів новизни.

$$N_{инт} = (0,225 \cdot 7/25) + (0,217 \cdot 19/30) + (0,042 \cdot 13/25) + (0,179 \cdot 11/25) + (0,12 \cdot 5/20) + (0,035 \cdot 12/20) + (0,036 \cdot 7/20) + (0,146 \cdot 5/20) = 0,403.$$

Отримане значення інтегрального рівня новизни зіставляємо зі шкалою, що наведена в табл. 5.5 [115].

Таблиця 5.5 – Рівні новизни нового товару та їхня характеристика

Рівні новизни товару	Значення інтегральної новизни	Характеристика товару	Вид нового товару
Найвища	1,00	Абсолютно новий товар	Новий товар, що наділений ознаками інноваційності (інноваційний товар)
Висока	0,8...0,99	Товар, який не має аналогів	
Значуща	0,6...0,79	Принципова зміна споживчих властивостей товару	
Достатня	0,4...0,59	Принципова технологічна модифікація товару	
Незначна	0,2...0,39	Кардинальна зміна параметрів	Новий товар
Помилкова	0,00...0,19	Малоістотна модифікація	

Згідно таблиці 5.5 розробка відповідає рівню при значенні інтегральної новизни 0,403 - достатня новизна; за характеристикою: принципова технологічна модифікація товару; вид розробки - новий товар, що наділений ознаками інноваційності (інноваційний товар).

### 5.3 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 розрахуємо за формулою [116]

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (5.3)$$

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

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

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

$\beta_i$  – відносне значення  $i$ -го технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення  $\beta_i$  для різних випадків розраховуємо за такими формулами:

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

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (5.4)$$

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

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}}; \quad (5.5)$$

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 5.6.

Таблиця 5.6 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Частота	МГц	700	900	1,29	0,2
Імпеданс	Ом	50	50	1	0,1
Підсилення	Дб	4	5	1,25	0,25
Коефіцієнт стоячої хвилі	рази	1,8	1,8	1	0,15
Максимальна потужність	Вт	2	5	2,5	0,3

Узагальнений коефіцієнт якості ( $B_n$ ) для нового технічного рішення складе:



$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 1,29 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,1 + 1,25 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,15 + 2,5 \cdot 0,3 = 1,57.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,57 рази.

#### 5.4 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Гнучка ширококутова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

##### 5.4.1 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 [115]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.6)$$

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.

$$Z_o = 12000,00 \cdot 16 / 22 = 8727,27 \text{ (грн)..}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – 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	12000,00	545,45	16	8727,27
Інженер розробник радіотехнічної апаратури	10200,00	463,64	11	5100,00
Інженер розробник телекомунікаційних систем 1-ї кат.	10100,00	459,09	8	3672,73
Технік	7450,00	338,64	10	3386,36
Всього				20886,36

#### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Гнучка широкопasmової антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.7)$$

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

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.8)$$

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) [115];

$K_c$  – 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.

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

$$Z_{p1} = 24,53 \cdot 6,00 = 147,20 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 5.8 – 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 обчислювального обладнання для проведення досліджень	6,00	2	1,10	24,53	147,20
Підготовка робочого місця інженера-конструктора	4,50	3	1,35	30,11	135,49
Інсталяція програмного забезпечення для моделювання та розробки	5,00	4	1,50	33,45	167,27
Контроль вхідних компонентів	1,50	4	1,50	33,45	50,18
Монтаж експериментальної моделі	10,50	4	1,50	33,45	351,27
Контроль ходу експериментів	7,00	3	1,35	30,11	210,76
Всього					1062,19

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.9)$$

де  $H_{\text{дод}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{дод}} = (20886,36 + 1062,19) \cdot 11 / 100\% = 2414,34 \text{ (грн.)}$$

#### 5.4.2 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

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.10)$$

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

$$Z_n = (20886,36 + 1062,19 + 2414,34) \cdot 22 / 100\% = 5359,84 \text{ (грн.)}$$

#### 5.4.3 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 «Гнучка ширококутова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж».

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

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j}, \quad (5.11)$$

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;

$C_{\text{в}j}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 2,00 \cdot 114,00 \cdot 1,11 - 0,000 \cdot 0,00 = 253,08 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.9 – 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
Офісний папір FAXE-500 A4	114,00	2,00	-	-	253,08
Папір для записів FAXE 70 A5-250	47,00	5,00	-	-	260,85
Органайзер офісний OFFICE 100	220,00	2,00	-	-	488,40
Набір офісний DATUM X-2	205,00	3,00	-	-	682,65
Картридж для принтера HP-2100	1010,00	1,00	-	-	1121,10
Диск оптичний OPTIMA CD	15,50	3,00	-	-	51,62
Flesh-пам'ять GOODRAM 64 C10A	420,00	1,00	-	-	466,20
Чорнило для плотера	500,00	0,15	-	-	83,25
Склотекстоліт СТФ 2 – 1.5 ДЕСТ 102-78	135,20	0,060	-	-	9,00
Припой ПОС-61 ДЕСТ 21931-86	280,00	0,011	-	-	3,42
Флюс ФКСП ОСТ	165,00	0,014	-	-	2,56
Міні-коаксіальний кабель діаметром 1,13 мм	2,50	0,153	-	-	0,42
Всього					3422,56

#### 5.4.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_6$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Гнучка широкосмугова антена для радіотехнологій доступу носимих

пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.12)$$

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

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

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

$$K_e = 1 \cdot 8,00 \cdot 1,11 = 8,88 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Мікрохвильовий роз'єм IPEX MHF1 (u.FL)	1	8,00	8,88
Всього			8,88

#### 5.4.5 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

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.13)$$

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.

$$B_{\text{спец}} = 3200,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 3552,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Монтажна станція ZORG-111	1	3200,00	3552,00
Генератор сигналу ГС-18АХ	1	4300,00	4773,00
Всього			8325,00

#### 5.4.6 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

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inpz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (5.14)$$

де  $C_{inpz}$  – 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.

$$B_{npz} = 4800,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 5328,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Прикладний пакет емуляції сигналів MatLab 10	1	4800,00	5328,00
Всього			5328,00

#### 5.4.7 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

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{е}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.15)$$

де  $Ц_{б}$  – 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;

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

$$A_{обл} = (21100,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 879,17 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 5.13 – 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	21100,00	2	1	879,17
Обчислювально-графічна система проектування	22498,00	2	1	937,42
Ноутбук HP Laptop 15-seq2037ua	32780,00	3	1	910,56
Робоче місце розробника радіопристроїв	9580,00	5	1	159,67
Пристрій виводу графічної інформації	8765,00	4	1	182,60
Оргтехніка	8925,00	4	1	185,94
Приміщення лабораторії	286000,00	20	1	1191,67
ОС Windows 11	7400,00	3	1	205,56
Прикладний пакет Microsoft Office 2019	6700,00	3	1	186,11
Всього				4838,68



#### 5.4.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.16)$$

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,  $K_{eni} < 1$ ;

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

$$B_e = 0,25 \cdot 120,0 \cdot 4,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 135,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.14 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер	0,25	120,0	135,00
Обчислювально-графічна система проектування	0,40	115,0	207,00
Ноутбук HP Laptop 15s-eq2037ua	0,05	115,0	25,88
Робоче місце розробника радіопристроїв	0,20	115,0	103,50
Пристрій виводу графічної інформації	0,60	5,0	13,50
Оргтехніка	0,65	7,5	21,94
Монтажна станція ZORG-111	0,04	5,0	0,90
Генератор сигналу ГС-18АХ	0,12	65,0	35,10
Всього			542,81

#### 5.4.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Гнучка широкосмугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфо-

комунікаційних мереж» 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

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

де  $H_{cv}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», приймемо  $H_{cv} = 20\%$ .

$$B_{cv} = (20886,36 + 1062,19) \cdot 20 / 100\% = 4389,71 \text{ (грн.)}.$$

5.4.10 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

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

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», приймемо  $H_{cn} = 30\%$ .

$$B_{cn} = (20886,36 + 1062,19) \cdot 30 / 100\% = 6584,56 \text{ (грн.)}.$$

5.4.11 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:

$$I_{\epsilon} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.19)$$

де  $H_{ie}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{ie} = 50\%$ .

$$I_{\epsilon} = (20886,36 + 1062,19) \cdot 50 / 100\% = 10974,27 \text{ (грн.)}$$

#### 5.4.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) 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 (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.20)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 100\%$ .

$$B_{нзв} = (20886,36 + 1062,19) \cdot 100 / 100\% = 21948,55 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Гнучка ширококутова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{одд} + Z_n + M + K_{\epsilon} + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_{\epsilon} + B_{нзв}. \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} B_{заг} &= 20886,36 + 1062,19 + 2414,34 + 5359,835901 + 3422,56 + 8,88 + 8325,00 + \\ &5328,00 + 4838,68 + 542,81 + 4389,71 + 6584,56 + 10974,27 + 21948,55 = \\ &= 96085,76 \text{ (грн.)} \end{aligned}$$

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

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.22)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta=0,95$ .

$$ЗВ = 96085,76 / 0,95 = 101142,90 \text{ ( грн.)}.$$

### 5.5 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 цієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Гнучка широкопугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

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

$\Delta N$  – 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	5500	4500	3000

$N$  – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 20400 осіб;

$C_6$  – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 135,00 (грн.);

$\pm\Delta C_o$  – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 12,00 (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 [115]

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right), \quad (5.23)$$

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

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту. Приймемо  $\rho = 30\%$ ;

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

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = (12,00 \cdot 20400,00 + 147,00 \cdot 5000) \cdot 0,83 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 200042,60 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (12,00 \cdot 20400,00 + 147,00 \cdot 10500) \cdot 0,83 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 365119,32 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (12,00 \cdot 20400,00 + 147,00 \cdot 15000) \cdot 0,83 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 500182,09 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (12,00 \cdot 20400,00 + 147,00 \cdot 18000) \cdot 0,83 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 590223,94 \text{ (грн.)}$$

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

$$ППП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^t}, \quad (5.24)$$

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;

$\tau$  – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні,  $\tau=0,14$ ;

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

$$\begin{aligned} ППП &= 200042,60/(1+0,14)^1 + 365119,32/(1+0,14)^2 + 500182,09/(1+0,14)^3 + \\ &+ 590223,94/(1+0,14)^4 = 175475,96 + 280947,46 + 337608,67 + 349459,96 = \\ &= 1143492,05 \text{ (грн.)}. \end{aligned}$$

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

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (5.25)$$

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 101142,90 (грн.).

$$PV = k_{инв} \cdot 3B = 2 \cdot 101142,90 = 202285,80 \text{ (грн.)}.$$

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

$$E_{abc} = III - PV \quad (5.26)$$

де  $III$  – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливо-го впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 1143492,05 (грн.);

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 202285,80 (грн.).

$$E_{abc} = III - PV = 1143492,05 - 202285,80 = 941206,24 \text{ (грн.)}$$

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

$$E_g = T_{жс} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (5.27)$$

де  $E_{abc}$  – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 941206,24(грн.);

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 202285,80 грн;

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

$$E_g = T_{жс} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1 = (1 + 941206,24/202285,80)^{1/4} - 1 = 0,54.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій  $\tau_{min}$

$$\tau_{min} = d + f, \quad (5.28)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2021 році в Україні  $d = 0,11$ ;

$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, прийmemo 0,15.

$\tau_{\min} = 0,11 + 0,15 = 0,26 < 0,54$  свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_g$ , 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 «Гнучка широкопугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж» доцільно.

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

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g}, \quad (5.29)$$

де  $E_g$  – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 0,54 = 1,85 \text{ р.}$$

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

## 5.6 Висновки до розділу

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Гнучка широкопугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж» становить 37,0 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 1,57 рази.

Також термін окупності становить 1,85 р., що менше 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.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Гнучка широкопasmова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж».

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

На дослідників, що проводять роботи з дослідження гнучкої ширококутної антени можуть впливати такі небезпечні та шкідливі фактори, у відповідності з прийнятою класифікацією за ГОСТ 12.0003.-74 [117].

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).

У роботі висвітлюються дослідження на тему «Коригування каналного ресурсу в захищених корпоративних мультисервісних мережах зв'язку», надалі, більш детально 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

Якщо існують 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. За таких умов праці мікроклімат вважається сухим. Вологими називаються умови роботи, де відносна вологість повітря становить від 60% до 75%. Сирі – це такі умови, які характеризуються відносною вологістю повітря в будівлі більшою за 75%. Особливо сирі умови – це умови, із майже стовідсотковою відносною вологістю повітря. Гарячими умовами праці є становище, при якому температура повітря перевищує 35 °С. Запиленими визнаються умови, при яких виділяється велика кількість виробничого пилу, внаслідок чого він може залишатись на зовнішніх поверхнях або навіть проникати у середину обладнання чи апаратів. До умов праці з хімічно активним середовищем відносять умови, при яких у повітрі протягом тривалого часу залишаються гази або краплі рідин, які негативно впливають на ізолюючі властивості і струмопровідні елементи електричних інструментів.

Класифікація приміщень за рівнем електробезпеки Відповідно до ПУЕ, усі промислові приміщення (цехи, майстерні, склади) за ступенем ймовірності ураження електричним струмом можна розділити на три категорії: Будівлі з підвищеною небезпекою До цього типу будівель належать споруди, в яких наявний принаймні один із таких факторів: сирі приміщення, відносна вологість в яких протягом тривалого часу перевищує 75%; приміщення, в яких пил покриває провідники, забивається всередину машин та обладнання; приміщення зі струмопровідними підлогами (металевими, земляними, цегляними, залізобетонними); приміщення, в яких середня температура повітря зазвичай переви-

щує +30 °С; приміщення, в яких існує ймовірність одночасного торкання співробітника до зовнішніх елементів електричного устаткування і заземлених металевих конструкцій будівель, технологічного обладнання тощо.

Будівлі з особливо небезпечними умовами Ці будівлі характеризуються як дуже сирі приміщення зі стовідсотковою відносною вологістю. Стеля, стіни, підлога, устаткування у таких приміщеннях постійно вкриті тонким шаром крапель чи пліснявою. Слід бути вкрай обережними, оскільки при виконанні робіт з використанням електричної напруги на відкритому повітрі, всередині посудин, всередині неприсохлих приміщень ймовірність ураження співробітників чи сторонніх осіб електричним струмом дуже висока. До будівель з особливо небезпечними умовами належать також споруди з хімічно активним середовищем, яке завдяки своїм властивостям завдає шкоду ізоляції та електричним матеріалам. Окрім того, будівлі, які мають одночасно дві або більше ознаки приміщень з підвищеною небезпекою так само належать до будівель із особливо небезпечними умовами.

Будівлі без факторів збільшеної небезпеки До цієї категорії належать будівлі, в яких немає жодної з ознак, властивих приміщенням з підвищеною або особливою небезпекою.

Підсумовуємо, що 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°C. Постійний моніторинг середовища, на предмет пилу та хімічно агресивних речовин у складі повітря, для забезпечення електробезпеки приміщення. Заземлення електропристроїв для уникнення аварійної ситуації.

## 6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 6.2.1 Мікроклімат

Метеорологічні умови виробничих приміщень (санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042–99) можна оцінювати за сукупніс-

тю таких факторів, як температура ( $t$ , °C), відносна вологість ( $\phi$ , %), швидкість руху повітря ( $V$ , м/с) та величина інтенсивності теплового опромінення ( $E$ , Вт/м<sup>2</sup>).

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 [119]. Допустимі мікрокліматичні умови – поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину можуть викликати зміни теплового стану організму, що швидко минають і нормалізуються та супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції в межах фізіологічної адаптації. При цьому не виникає ушкоджень або порушень стану здоров'я, але можуть спостерігатися дискомфортні тепловідчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності [119].

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

Визначаємо наявну категорію робіт, як Ib. Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 [121].

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

Для забезпечення комфортності і безпеки трудового процесу рекомендовано дотримуватись вищенаведених параметрів мікроклімату і корегувати їх відповідними технічними засобами: системою опалення, вентиляції, кондиціонування.

#### 6.2.2. Склад повітря робочої зони

При виконанні даного виду робіт немає небезпеки виділення шкідливих речовин у повітря, але потрібен контроль за складом повітря робочої зони та при збільшенні допустимих норм проводити заходи, щодо усунення надлишку шкідливих речовин.

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачені наступні рішення:

- застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановлені безпосередньо на ділянках 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 [122] 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

При експлуатації штучного освітлення здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

#### 6.2.4 Виробничий шум

Звук або шум виникає при механічних коливаннях у твердих, рідких та газоподібних середовищах. Звуки, що передаються будівельними конструкціями, називаються структурними, а ті що поширюються у повітряному середовищі, прийнято називати повітряним шумом. Будь-який небажаний звук називають шумом. Шум шкідливий для здоров'я, зменшує працездатність, підвищує рівень небезпеки. Тому необхідно передбачати заходи захисту від шуму. А для цього потрібно володіти відповідними знаннями. Як правило, шум нас дратує: заважає працювати, відпочивати, думати. Але шум може впливати і позитивно. Такий вплив на людину чинить, наприклад, шелест листя дерев, помірний сту-

кіт дощових крапель, рокіт морського прибою. Позитивний вплив спокійної приємної музики відомий з давніх часів. Тому різноманітні оздоровчі процедури супроводжуються спокійною симфонічною або блюзовою музикою.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [122]. 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 коефіцієнтом 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 за допомогою спеціальних матеріалів.

#### 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.

На етапі проектування взаємне розміщення об'єктів має бути забезпечено таким чином, щоб інтенсивність опромінення була мінімальною. Також треба заздалегідь попідкуватися про зменшення часу перебування персоналу у зоні опромінення. Потужність джерел випромінювання повинна бути найменшою з можливих.

#### 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 [122].

Оптимальні умови 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).

6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи інфокомунікаційної мережі в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

В даній частині розділу необхідно провести дослідження безпеки роботи інфокомунікаційної мережі в умовах дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу так як саме ці фактори можуть вивести з ладу пристрій, чи порушити його роботу.

Вплив радіації призводить як до оборотних, так і необоротних змін електричних властивостей твердотільних приладів і інтегральних схем. Оскільки такі зміни можуть приводити до відмов електронних блоків, значні зусилля останнім часом направляються на розробку методів, що дозволяють уникнути погіршення параметрів мікроелектронного обладнання при опроміненні. У багатьох випадках вирішувати цю проблему доцільно шляхом створення радіаційно-стійких приладів і інтегральних схем [123].

До часток, які при влученні в прилади й схеми можуть викликати небажані наслідки, відносяться електрони, протони, фотони, альфа-частинки, важкі іони. Основні наслідки впливу опромінення на електронні пристрої – іонізація і зсув атомів. Вони викликають різні зміни в напівпровідникових приладах.

При бомбардуванні кремнію фотони й заряджені частинки можуть викликати зсув атомів з положення рівноваги. У випадку фотонів цей процес реалізується за рахунок появи комптоновських електронів з досить великою енергією, які потім взаємодіють із ядрами мішені. Поки ядрам передається мінімальна енергія (для кремнію 21 еВ), буде відбуватися зсув атомів. Відсутність атома у своєму нормальному положенні – це перший вид радіаційного дефекту.

В опроміненому кремнії можуть зустрічатися різні типи дефектів. Елементарні дефекти іноді називають точковими або ізольованими. Можливе виникнення областей з більшим числом досить близько розташованих дефектів. Така область називається кластером дефектів або каскадом зсувів. Згідно з фізикою напівпровідників, атоми домішок в решітках кремнію мають дискретні рівні енергії, які лежать у забороненій зоні між мінімумом зони провідності й максимумом валентної зони. Порушення періодичності атомної решітки може привести до виникнення деяких рівнів енергії в забороненій зоні. До їхньої появи призводять, зокрема, радіаційні дефекти, і саме ці дефектні стани або центри впливають на електричні властивості напівпровідникових приладів. Тому є необхідним провести дослідження стійкості роботи інфокомунікаційної мережі саме при впливах іонізуючих випромінюваннях та електромагнітному імпульсі.

### 6.3.1 Дослідження безпеки роботи інфокомунікаційної мережі в умовах дії іонізуючих випромінювань

За критерій безпеки роботи інфокомунікаційної мережі в цих умовах приймається таке максимальне значення дози опромінення елементної бази ( $D_{зрi}, P$ ), при якому в елементній базі можуть виникнути зміни, але РЕА ще буде працювати з необхідною якістю.

В якості критерію по стійкості роботи можна використати граничне значення дози радіації

$$D_{зр} = k \cdot D_{зв} \cdot k_{посл}, \quad (6.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт надійності (приймається  $k = 0,92$ );

$D_{зв}$  – доза, яка відповідає початку зворотних змін в елементах;

$k_{посл}$  - коефіцієнт послаблення радіації (приймається  $k_{посл} = 5$ ).

Доза, яка відповідає початку зворотних змін в елементах, що дорівнює мінімальному значенню  $D_{зрi}$ . Оскільки дана мережа міститиме в своїй будові мікросхеми, тому допустима експозиційна доза цих елементів РЕС становитиме  $D_{зрi} = 10^3$  (Р). Отже подальші розрахунки проводяться відповідно до цього значення.

Шляхом підстановки числових значень в (6.1) розраховується  $D_{зр}$

$$D_{зр} = 0,92 \cdot 10^3 \cdot 5 = 4600(P).$$

Отже, працездатність інфокомунікаційної мережі в умовах дії іонізуючих випромінювань можлива при значеннях  $D_{зр} < 4600P$ .

6.3.2 Дослідження безпеки роботи інфокомунікаційної мережі в умовах дії електромагнітного імпульсу

Початкові дані: напруга живлення:  $U_{жс} = 12В$ ; максимальна довжина горизонтальної струмопровідної частини електричної принципової схеми:  $l_B = 5 м$ .

В якості показника стійкості елементів інфокомунікаційної мережі до дії електромагнітного імпульсу використовують коефіцієнт безпеки [123]

$$K_{\delta} = 20 \lg \frac{U_{\delta}}{U_{B(\Gamma)}} \geq 40 \text{ [дБ]}, \quad (6.2)$$

де  $U_{\delta}$  - допустиме коливання напруги живлення;

$U_{B(\Gamma)}$  - напруга наведена за рахунок електромагнітного імпульсу у вертикальних (горизонтальних) струмопровідних системах.

Спочатку визначається допустиме коливання напруги живлення:

$$U_{\delta} = U_{жс} + \frac{U_{жс}}{100} \cdot N, \quad (6.3)$$

де  $N$  - допустимі коливання (приймається  $N = 5\%$ )

Шляхом підстановки числових даних в (7.3) отримується:

$$U_{\delta} = 12 + \frac{12}{100} \cdot 5 = 12,6(В).$$

Визначається максимально очікувана напруга в горизонтальних лініях [123]

$$U_B = \frac{U_{\delta}}{10^{\frac{K}{20}}} \quad (6.4)$$

Після підстановки числових даних:

$$U_B = \frac{12,6}{\frac{40}{10^{20}}} = 0,126(B).$$

З формули визначається горизонтальна складова напруженості електричного поля [123]

$$U_B = E_{\Gamma} \cdot l_B. \quad (6.5)$$

Отже,  $E_{\Gamma}$  визначається

$$E_{\Gamma} = \frac{U_B}{l_B}. \quad (6.6)$$

Після підстановки числових даних в формулу (6.6)

$$E_{\Gamma} = \frac{0,126}{5} = 0,0252(B/m).$$

Вертикальна складова напруженості електричного поля визначається з формули [123]

$$E_{\Gamma} = 10^{-3} \cdot E_B. \quad (6.7)$$

Тоді  $E_B$  буде

$$E_B = 0,0252 \cdot 1000 = 25,2(B/m).$$

Це значення вертикальної складової напруженості електромагнітного поля можна вважати граничним, до якого гарантується безпечна робота інфокомунікаційної мережі .

#### 6.4 Висновки до розділу

Отже, в даному розділі було проведено дослідження безпеки роботи інфокомунікаційної мережі при дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу. Як видно з отриманих результатів, інфокомунікаційна мережа є стійкою до дії іонізуючих випромінювань.



Згідно з виконаними розрахунками безпека роботи інфокомунікаційної мережі в умовах дії електромагнітного імпульсу можлива при напруженості вертикальної складової електричного поля в значеннях  $E_B < 25,2 \text{ В/м}$ .

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі розорблено та досліджено гнучку ширококумугову антену для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж.

Сфера гнучких антен демонструє експоненціальне зростання через попит на носяться пристрої, інфраструктуру Інтернету речей (IoT), пристрої для надання медичної допомоги, платформу персоналізованої медицини, технологію 5G, бездротові сенсорні мережі і пристрої зв'язку з меншим форм-фактором. на-звати кілька. Вибір гнучких антен залежить від конкретного застосування і залежить від типу підкладки, використовуваних матеріалів, технологій обробки, характеристик антени і навколишнього середовища. Існує безліч інновацій в дизайні, нові матеріали і властивості матеріалів, оригінальні методи виготовлення та найновіші застосування. У роботі основна увага приділяється необхідності гнучких антен, матеріалами і процесам, використовуваним для виготовлення антен, різних властивостей матеріалів, що впливають на характеристики антен, і конкретним біомедичних застосувань, що супроводжується конструктивними міркуваннями. Після всебічного розгляду вищезазначених тем в роботі основну увагу приділено внутрішнім проблемам і майбутнім перспективам гнучких антен.

Електронні пристрої у гнучкій формі необхідні для віддаленої охорони здоров'я. Важливим завданням, яке виникає при проектуванні ширококумугових антен для медичних пристроїв, що носяться, є розробка форми антени, яка впишеться в корпус пристрою і забезпечить необхідне підсилення. До форми діаграми спрямованості такої антени були висунуті жорсткі вимоги. Розроблена гнучка ширококумугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж забезпечує стабільний прийом із будь-якого напрямку у міському середовищі. Також форма діаграми спрямованості має відповідати вимогам електромагнітної сумісності під час використання мобільного медичного пристрою. Остання вимога до форми діаграми спрямованості

гнучкої антени пов'язана з наявністю поверхонь, що впливають на узгодження радіопристрою в робочій смузі частот.

У магістерській дипломній роботі було розроблено гнучку широкосмугову антену для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж для діапазонів частот B3 1800 МГц (DCS, висхідний канал 1710-1785 МГц, низхідний канал 1805-1880 МГц) і B20 800 МГц (цифровий дивіденд, висхідний канал 83 ). Лінійні розміри антени 20,8×70,8 мм. Матеріал антени – поліімід товщиною 0,3 мм. Пікова потужність складає 23 дБі. Оригінальний дизайн антени та її оптимальне узгодження з носимим LTE пристроєм дозволяють: 1) зменшити вплив ємності та опору антени при надяганні браслета на руку; 2) зменшити зміну просторової діаграми спрямованості антени при згині браслета; 3) мінімізувати вплив навколишніх параметрів на роботу гнучкої широкосмугової антени LTE; 4) забезпечити надійний зв'язок пристрою в мережі LTE (або NB IoT).

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки становить 37,0 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 1,57 рази. Також термін окупності становить 1,85 р., що менше 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.

У розділі охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях було проведено дослідження безпеки роботи інфокомунікаційної мережі при дії іонізуючих випромінювань та електромагнітного імпульсу. Як видно з отриманих результатів, інфокомунікаційна мережа є стійкою до дії іонізуючих випромінювань.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Abbasi, M.A.B.; Nikolaou, S.S.; Antoniadis, M.A.; Stevanović, M.N.; Vryonides, P. Compact EBG-backed planar monopole for BAN wearable applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017, 65, 453–463.
2. 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.
3. Yan, S.; Volskiy, V.; VandenBosch, G.A.E. Compact Dual-Band Textile PIFA for 433-MHz/2.4-GHz ISM Bands. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, 16, 2436–2439.
4. Gao, G.; Hu, B.; Wang, S.; Yang, C. Wearable planar inverted-F antenna with stable characteristic and low specific absorption rate. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2018, 60, 876–882.
5. Michel, A.; Colella, R.; Casula, G.A.; Nepa, P.; Catarinucci, L.; Montisci, G.; Mazzarella, G.; Manara, G. Design Considerations on the Placement of a Wearable UHF-RFID PIFA on a Compact Ground Plane. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018, 66, 3142–3147.
6. Owadally, A.; Parini, C.G.; Nechayev, Y.; Constantinou, C.C.; Hall, P.S.; Alomainy, A.; Hao, Y. Statistical Analysis and Performance Evaluation for On-Body Radio Propagation with Microstrip Patch Antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2007, 55, 245–248.
7. C.A. Balanis, *Antenna Theory. Analysis and Design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016. 1072 p.
8. Moro, R.; Agneessens, S.; Rogier, H.; Dierck, A.; Bozzi, M. Textile Microwave Components in Substrate Integrated Waveguide Technology. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2015, 63, 422–432.
9. Семенов А.О., Иванов О.С., Шмата В.С. LTE широкополосная антенна для радиотехнологий доступа инфокоммуникационных устройств. 8-а Міжнародна нау-

ково-практична конференція «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПІРН-2021). 03-05 листопада 2021, Вінниця, ВНТУ.

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/spirn/spirn2021/paper/viewFile/13911/117>

80

10. Mohamadzade, B.; Hashmi, R.M.; Simorangkir, R.B.V.B.; Gharaei, R.; Ur Rehman, S.; Abbasi, Q.H. Recent Advances in Fabrication Methods for Flexible Antennas in Wearable Devices: State of the Art. *Sensors* **2019**, *19*, 2312.

<https://doi.org/10.3390/s19102312>

11. Islam, M.R.; Ali, M. A 900 MHz Beam Steering Parasitic Antenna Array for Wearable Wireless Applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2013, *61*, 4520–4527.

12. Pinapati, S.P.; Ranasinghe, D.C.; Fumeaux, C. Textile Multi-Layer Cavity Slot-Monopole for UHF Applications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, *16*, 1.

13. Chahat, N.; Zhadobov, M.; Le Coq, L.; Sauleau, R. Wearable Endfire Textile Antenna for On-Body Communications at 60 GHz. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2012, *11*, 799–802.

14. Sabri, S.F.; Sam, S.M.; Kamardin, K.; Daud, S.M.; Salleh, N. Review of the Current Design on Wearable Antenna in Medical Field and its Challenges. *J. Teknol.* 2016, *78*, 111–117.

15. Gupta, B.; Sankaralingam, S.; Dhar, S. Development of wearable and implantable antennas in the last decade: A review. In *Proceedings of the 2010 10th Mediterranean Microwave Symposium, Guzelyurt, Cyprus, 25–27 August 2010*.

16. Roh, J.S.; Chi, Y.S.; Kang, T.J. Wearable textile antennas. *Int. J. Fash. Des. Technol. Edu.* 2010, *3*, 135–153.

17. Wang, J.C.; Lim, E.G.; Leach, M.; Wang, Z.; Man, K.L.; Huang, Y. Review of wearable antennas for WBAN applications. *IAENG Int. J. Comput. Sci.* 2016, *43*, 16–19.

18. Yan, S.; Soh, P.J.; VandenBosch, G.A.E. Wearable Ultrawideband Technology—A Review of Ultrawideband Antennas, Propagation Channels, and Applications in Wireless Body Area Networks. *IEEE Access* 2018, 6, 42177–42185.
19. Nepa, P.; Rogier, H. Wearable Antennas for Off-Body Radio Links at VHF and UHF Bands: Challenges, the state of the art, and future trends below 1 GHz. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2015, 57, 30–52.
20. Wang, Z.; Zhang, L.; Volakis, J.L. Textile antennas for wearable radio frequency applications. *Text. Light Indust. Sci. Technol.* 2013, 2, 105–112.
21. Priya, A.; Kumar, A.; Chauhan, B. A Review of Textile and Cloth Fabric Wearable Antennas. *Int. J. Comput. Appl.* 2015, 116, 1–5.
22. Stoppa, M.; Chiolerio, A. Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review. *Sensors* 2014, 14, 11957–11992. [PubMed]
23. Dhupkariya, S.; Singh, V.K.; Shukla, A. A review of textile materials for wearable antenna. *J. Microw. Eng. Technol.* 2015, 1, 1–8.
24. Zeng, W.; Shu, L.; Li, Q.; Chen, S.; Wang, F.; Tao, X.-M. Fiber-Based Wearable Electronics: A Review of Materials, Fabrication, Devices, and Applications. *Adv. Mater.* 2014, 26, 5310–5336. [PubMed]
25. Tsolis, A.; Whittow, W.G.; Alexandridis, A.A.; Vardaxoglou, J.C. Embroidery and Related Manufacturing Techniques for Wearable Antennas: Challenges and Opportunities. *Electronics* 2014, 3, 314–338.
26. Salvado, R.; Loss, C.; Gonçalves, R.; Pinho, P. Textile Materials for the Design of Wearable Antennas: A Survey. *Sensors* 2012, 12, 15841–15857.
27. Zhang, L.; Wang, Z.; Volakis, J.L. Textile Antennas and Sensors for Body-Worn Applications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2012, 11, 1690–1693.
28. Sankaralingam, S.; Gupta, B. Determination of Dielectric Constant of Fabric Materials and Their Use as Substrates for Design and Development of Antennas for Wearable Applications. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2010, 59, 3122–3130.
29. Seager, R.; Dias, T.; Zhang, S.; Acti, T.; Vardaxoglou, Y.; Whittow, W.; Chauraya, A.; Seager, R. Effect of the fabrication parameters on the performance of embroidered antennas. *IET Microwaves, Antennas Propag.* 2013, 7, 1174–1181.

30. Kiourti, A.; Volakis, J.L. High-Geometrical-Accuracy Embroidery Process for Textile Antennas With FineDetails. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2015, 14, 1474–1477.
31. Simorangkir, R.B.V.B.; Yang, Y.; Esselle, K.P. Double-layer embroidery strategy for fabrication of textileantennas with improved efficiency. In *Proceedings of the 2016 17th International Symposium on AntennaTechnology and Applied Electromagnetics (ANTEM)*, Montreal, QC, Canada, 10–13 July 2016
32. Ouyang, Y.; Chappell, W. High Frequency Properties of Electro-Textiles for Wearable Antenna Applications.*IEEE Trans. Antennas Propag.* 2008, 56, 381–389.
33. Tak, J.; Choi, J.; Lee, S. All-textile higher order mode circular patch antenna for on-body to on-bodycommunications. *IET Microwaves, Antennas Propag.* 2015, 9, 576–584.
34. Kiourti, A.; Lee, C.; Volakis, J.L. Fabrication of Textile Antennas and Circuits With 0.1 mm Precision.*IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2016, 15, 151–153.
35. Zhong, J.; Kiourti, A.; Sebastian, T.; Bayram, Y.; Volakis, J.L. Conformal Load-Bearing Spiral Antenna onConductive Textile Threads. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, 16, 230–233.
36. Roh, J.-S.; Chi, Y.-S.; Lee, J.-H.; Tak, Y.; Nam, S.; Kang, T.J. Embroidered Wearable Multiresonant FoldedDipole Antenna for FM Reception. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2010, 9, 803–806.
37. Wang, Z.; Lee, L.Z.; Psychoudakis, D.; Volakis, J.L. Embroidered Multi-band Body-Worn Antenna forGSM/PCS/WLAN Communications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2014, 62, 3321–3329.
38. Ivsic, B.; Bonefacic, D.; Bartolic, J. Considerations on Embroidered Textile Antennas for Wearable Applications.*IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2013, 12, 1708–1711.
39. Simorangkir, R.B.V.B.; Yang, Y.; Esselle, K.P. Performance of embroidered higher-order mode antennaswith different stitching patterns. In *Proceedings of*

the 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, France, 19–24 March 2017.

40. Moradi, E.; Björninen, T.; Ukkonen, L.; Rahmat-Samii, Y. Effects of Sewing Pattern on the Performance of Embroidered Dipole-Type RFID Tag Antennas. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2012, 11, 1482–1485.

41. Wang, Z.; Zhang, L.; Bayram, Y.; Volakis, J.L. Embroidered Conductive Fibers on Polymer Composite for Conformal Antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2012, 60, 4141–4147.

42. Zhang, S.; Whittow, W.; Seager, R.; Chauraya, A.; Vardaxoglou, J.C. Non-uniform mesh for embroidered microstrip antennas. *IET Microwaves, Antennas Propag.* 2017, 11, 1086–1091.

43. Koski, K.; Vena, A.; Sydanheimo, L.; Ukkonen, L.; Rahmat-Samii, Y. Design and Implementation of Electro-Textile Ground Planes for Wearable UHF RFID Patch Tag Antennas. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2013, 12, 964–967.

44. Alharbi, S.; Chaudhari, S.; Inshaar, A.; Shah, H.; Zou, C.; Harne, R.L.; Kiourti, A. E-Textile Origami Dipole Antennas with Graded Embroidery for Adaptive RF Performance. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2018, 17, 2218–2222.

45. Lilja, J.; Salonen, P.; Kaija, T.; De Maagt, P. Design and Manufacturing of Robust Textile Antennas for Harsh Environments. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2012, 60, 4130–4140.

46. Trajkovikj, J.; Zürcher, J.F.; Skrivervik, A.K. PDMS, a robust casing for flexible W-BAN antennas [EurAAP Corner]. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2013, 55, 287–297.

47. Abbasi, Q.H.; Rehman, M.U.; Yang, X.; Alomainy, A.; Qaraqe, K.; Serpedin, E. Ultrawideband Band-Notched Flexible Antenna for Wearable Applications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2013, 12, 1606–1609.

48. Zhou, Y.; Bayram, Y.; Du, F.; Dai, L.; Volakis, J.L. Polymer-Carbon Nanotube Sheets for Conformal Load Bearing Antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2010, 58, 2169–2175.



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. 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. [PubMed]
51. Kiourti, A.; Volakis, J.L. Stretchable and Flexible E-Fiber Wire Antennas Embedded in Polymer. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2014, 13, 1381–1384.
52. Simorangkir, R.B.V.B.; Yang, Y.; Esselle, K.P.; Zeb, B.A. A Method to Realize Robust Flexible Electronically Tunable Antennas Using Polymer-Embedded Conductive Fabric. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018, 66, 50–58.
53. Simorangkir, R.; Yang, Y.; Esselle, K. Robust Implementation of Flexible Wearable Antennas with PDMS-Embedded Conductive Fabric. In *Proceedings of the 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, London, UK, 9–13 April 2018.
54. Garg, R.; Bhartia, P.; Bahl, I.J.; Ittipiboon, A. Rectangular microstrip antennas. In *Microstrip Antenna Design Handbook*; Artech House: Norwood, MA, USA, 2001; p. 265.
55. Zhou, W.-Y.; Qi, S.-H.; Zhao, H.-Z.; Liu, N.-L. Thermally conductive silicone rubber reinforced with boron nitride particle. *Polym. Compos.* 2007, 28, 23–28.
56. Alqadami, A.S.M.; Jamlos, M.F.; Soh, P.J.; VandenBosch, G.A.E. Assessment of PDMS Technology in a MIMO Antenna Array. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2016, 15, 1.
57. Simorangkir, R.B.V.B.; Matekovits, L.; Esselle, K.; Yang, Y. Dual-Band Dual-Mode Textile Antenna on PDMS Substrate for Body-Centric Communications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, 16, 1.
58. Cresson, P.-Y.; Orlic, Y.; Legier, J.-F.; Paleczny, E.; Dubois, L.; Tiercelin, N.; Coquet, P.; Pernod, P.; Lasri, T. 1 to 220 GHz Complex Permittivity Behavior of Flexible Polydimethylsiloxane Substrate. *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.* 2014, 24, 278–280.

59. Jang, T.; Zhang, C.; Youn, H.; Zhou, J.; Guo, L.J. Semitransparent and Flexible Mechanically Reconfigurable Electrically Small Antennas Based on Tortuous Metallic Micromesh. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017, 65, 150–158.
60. Simorangkir, R.B.V.B.; Yang, Y.; Hashmi, R.M.; Bjorninen, T.; Esselle, K.P.; Ukkonen, L. Polydimethylsiloxane-Embedded Conductive Fabric: Characterization and Application for Realization of Robust Passive and Active Flexible Wearable Antennas. *IEEE Access* 2018, 6, 48102–48112.
61. 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.
62. Mazlouman, S.J.; Jiang, X.J.; Mahanfar, A.; Menon, C.; Vaughan, R.G. A Reconfigurable Patch Antenna Using Liquid Metal Embedded in a Silicone Substrate. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2011, 59, 4406–4412.
63. Cheng, S.; Wu, Z.; Hallbjorner, P.; Hjort, K.; Rydberg, A. Foldable and Stretchable Liquid Metal Planar Inverted Cone Antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2009, 57, 3765–3771.
64. Hayes, G.J.; So, J.-H.; Qusba, A.; Dickey, M.D.; Lazzi, G. Flexible Liquid Metal Alloy (EGaIn) Microstrip Patch Antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2012, 60, 2151–2156.
65. Cosker, M.; Lizzi, L.; Ferrero, F.; Staraj, R.; Ribero, J.-M. Realization of 3D Flexible Antennas using Liquid Metal and Additive Printing Technologies. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, 16, 1.
66. Khaleel, H.R. Design and Fabrication of Compact Inkjet Printed Antennas for Integration Within Flexible and Wearable Electronics. *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.* 2014, 4, 1722–1728.
67. Rizwan, M.; Virkki, J.; Ukkonen, L.; Khan, M.W.A.; Sydanheimo, L. Flexible and Stretchable Brush-Painted Wearable Antenna on a Three-Dimensional (3-D) Printed Substrate. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2017, 16, 3108–3112.

68. Scarpello, M.L.; Kazani, I.; Hertleer, C.; Rogier, H.; Ginste, D.V. Stability and Efficiency of Screen-Printed Wearable and Washable Antennas. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2012, 11, 838–841.
69. Li, X.; Honari, M.M.; Fu, Y.; Kumar, A.; Saghlatoon, H.; Mousavi, P.; Chung, H.-J. Self-reinforcing graphene coatings on 3D printed elastomers for flexible radio frequency antennas and strain sensors. *Flex. Print. Electron.* 2017, 2, 035001.
70. Nikolaou, S.; Ponchak, G.; Papapolymerou, J.; Tentzeris, M. Conformal Double Exponentially Tapered Slot Antenna (DETTSA) on LCP for UWB Applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2006, 54, 1663–1669.
71. Genovesi, S.; Costa, F.; Fanciulli, F.; Monorchio, A. Wearable Inkjet-Printed Wideband Antenna by using Miniaturized AMC for Sub-GHz Applications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2016, 15, 1.
72. Chauraya, A.; Tudor, J.; Vardaxoglou, J.C.; Torah, R.; Li, Y.; Whittow, W.G.; Beeby, S.; Yang, K.; Beeby, S. Inkjet printed dipole antennas on textiles for wearable communications. *IET Microwaves, Antennas Propag.* 2013, 7, 760–767.
73. Durgun, A.C.; Balanis, C.A.; Birtcher, C.R.; Allee, D.R. Design, Simulation, Fabrication and Testing of Flexible Bow-Tie Antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2011, 59, 4425–4435.
74. Lakafosis, V.; Rida, A.; Vyas, R.; Yang, L.; Nikolaou, S.; Tentzeris, M.M. Progress Towards the First Wireless Sensor Networks Consisting of Inkjet-Printed, Paper-Based RFID-Enabled Sensor Tags. *Proc. IEEE* 2010, 98, 1601–1609.
75. Saeed, S.M.; Balanis, C.A.; Birtcher, C.R. Inkjet-printed flexible reconfigurable antenna for conformal WLAN/WiMAX wireless devices. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2016, 15, 1979–1982.
76. 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.
77. Ahmed, S.; Tahir, F.A.; Shamim, A.; Cheema, H.M. A Compact Kapton-based Inkjet Printed Multiband Antenna for Flexible Wireless Devices. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2015, 14, 1.

78. Abutarboush, H.F.; Farooqui, M.F.; Shamim, A. Inkjet-printed wideband antenna on resin-coated papersubstrate for curved wireless devices. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2016, 15, 20–23.
79. Li, Y.; Torah, R.; Beeby, S.; Tudor, J. An all-inkjet printed flexible capacitor on a textile using a newpoly(4-vinylphenol) dielectric ink for wearable applications. In *Proceedings of the 2012 IEEE Sensors, Taipei, Taiwan, 28–31 October 2012*.
80. Thielens, A.; Deckman, I.; Aminzadeh, R.; Arias, A.C.; Rabaey, J.M. Fabrication and Characterization ofFlexible Spray-Coated Antennas. *IEEE Access* 2018, 6, 62050–62061.
81. Jilani, S.F.; Abbasi, Q.H.; Alomainy, A. Inkjet-Printed Millimetre-Wave PET-Based Flexible Antenna for 5GWireless Applications. In *Proceedings of the 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G), Dublin, Ireland, 30–31 August 2018*.
82. Whittow, W.G.; Chauraya, A.; Vardaxoglou, J.C.; Li, Y.; Torah, R.; Yang, K.; Beeby, S.; Tudor, J. Inkjet-PrintedMicrostrip Patch Antennas Realized on Textile for Wearable Applications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2014, 13, 71–74.
83. Le, T.; Song, B.; Liu, Q.; Bahr, R.A.; Moscato, S.; Wong, C.-P.; Tentzeris, M.M. A novel strain sensor based on3D printing technology and 3D antenna design. In *Proceedings of the 2015 IEEE 65th Electronic Componentsand Technology Conference (ECTC), San Diego, CA, USA, 26–29 May 2015*; pp. 981–986.
84. Moscato, S.; Bahr, R.; Le, T.; Pasian, M.; Bozzi, M.; Perregrini, L.; Tentzeris, M.M.; Tentzeris, E. Infill Dependent3D-Printed Material Based on NinjaFlex Filament for Antenna Applications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2016, 15, 1.
85. Adams, J.J.; Duoss, E.B.; Malkowski, T.F.; Motala, M.J.; Ahn, B.Y.; Nuzzo, R.G.; Bernhard, J.T.; Lewis, J.A. Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-Dimensional Surfaces. *Adv. Mater.* 2011, 23, 1335–1340.
86. Ota, H.; Emaminejad, S.; Gao, Y.; Zhao, A.; Wu, E.; Challa, S.; Chen, K.; Fahad, H.M.; Jha, A.K.; Kiriya, D.; et al. Application of 3D Printing for Smart Ob-

jects with Embedded Electronic Sensors and Systems. *Adv. Mater. Technol.* 2016, 1, 1600013.

87. Nate, K.; Tentzeris, M.M. A novel 3-D printed loop antenna using flexible NinjaFlex material for wearable and IoT applications. In *Proceedings of the 2015 IEEE 24th Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)*, San Jose, CA, USA, 25–28 October 2015; pp. 171–174.

88. He, H.; Akbari, M.; Sydänheimo, L.; Ukkonen, L.; Virkki, J.; Sydänheimo, L. 3D-Printed Graphene Antennas and Interconnections for Textile RFID Tags: Fabrication and Reliability towards Humidity. *Int. J. Antennas Propag.* 2017, 2017, 1–5.

89. Ur-Rehman, M.; Malik, N.A.; Yang, X.; Abbasi, Q.H.; Zhang, Z.; Zhao, N. A Low Profile Antenna for Millimeter-Wave Body-Centric Applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017, 65, 6329–6337.

90. Pellegrini, A.; Brizzi, A.; Zhang, L.; Ali, K.; Hao, Y.; Wu, X.; Constantinou, C.C.; Nechayev, Y.; Hall, P.S.; Chahat, N.; et al. Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communications at Millimeter-Wave Frequencies: A Review [Wireless Corner]. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2013, 55, 262–287.

91. Chahat, N.; Valerio, G.; Zhadobov, M.; Sauleau, R. On-body propagation at 60 GHz. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2013, 61, 1876–1888.

92. Guraliuc, A.R.; Zhadobov, M.; Valerio, G.; Chahat, N.; Sauleau, R. Effect of Textile on the Propagation Along the Body at 60 GHz. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2014, 62, 1489–1494.

93. Chahat, N.; Zhadobov, M.; Le Coq, L.; Alekseev, S.I.; Sauleau, R. Characterization of the Interactions Between a 60-GHz Antenna and the Human Body in an Off-Body Scenario. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2012, 60, 5958–5965.

94. Chahat, N.; Zhadobov, M.; Muhammad, S.A.; Le Coq, L.; Sauleau, R. 60-GHz Textile Antenna Array for Body-Centric Communications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2013, 61, 1816–1824.

95. Tehrani, B.K.; Cook, B.S.; Tentzeris, M.M. Inkjet Printing of Multilayer Millimeter-Wave Yagi-Uda Antennas on Flexible Substrates. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2016, 15, 1.
96. Jilani, S.F.; Munoz, M.O.; Abbasi, Q.H.; Alomainy, A.; Torrico, M.M.; Abbasi, Q. Millimeter-Wave Liquid Crystal Polymer Based Conformal Antenna Array for 5G Applications. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2019, 18, 84–88.
97. Hage-Ali, S.; Tiercelin, N.; Coquet, P.; Sauleau, R.; Fujita, H.; Preobrazhensky, V.; Pernod, P. A Millimeter-Wave Microstrip Antenna Array on Ultra-Flexible Micromachined Polydimethylsiloxane (PDMS) Polymer. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2009, 8, 1306–1309.
98. LeDuc, C.; Zhadobov, M. Impact of Antenna Topology and Feeding Technique on Coupling with Human Body: Application to 60-GHz Antenna Arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017, 65, 6779–6787.
99. Chen, W.-T.; Chuang, H.-R. Numerical computation of human interaction with arbitrarily oriented superquadric loop antennas in personal communications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1998, 46, 821–828.
100. Johnson, C.; Guy, A. Nonionizing electromagnetic wave effects in biological materials and systems. *Proc. IEEE* 1972, 60, 692–718.
101. Watanabe, S.-I.; Taki, H.; Nojima, T.; Fujiwara, O. Characteristics of the SAR distributions in a head exposed to electromagnetic fields radiated by a hand-held portable radio. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1996, 44, 1874–1883.
102. Gabriel, C. Tissue equivalent material for hand phantoms. *Phys. Med. Boil.* 2007, 52, 4205–4210. [PubMed]
103. Gabriel, S.; Lau, R.W.; Gabriel, C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Phys. Med. Boil.* 1996, 41, 2271–2293.
104. Lazebnik, M.; McCartney, L.; Popovic, D.; Watkins, C.B.; Lindstrom, M.J.; Harter, J.; Sewall, S.; Magliocco, A.; Booske, J.H.; Okoniewski, M.; et al. A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal

breast tissue obtained from reduction surgeries. *Phys. Med. Boil.* 2007, 52, 2637–2656. [PubMed]

105. Takimoto, T.; Onishi, T.; Saito, K.; Takahashi, M.; Uebayashi, S.; Ito, K. Characteristics of biological tissue-equivalent phantoms applied to UWB communications. *Electron. Commun. Part I Commun.* 2007, 90, 48–55.

106. Kobayashi, T.; Nojima, T.; Yamada, K.; Uebayashi, S. Dry phantom composed of ceramics and its application to SAR estimation. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1993, 41, 136–140.

107. Ito, K.; Furuya, K.; Okano, Y.; Hamada, L. Development and characteristics of a biological tissue-equivalent phantom for microwaves. *Electron. Commun. Part I Commun.* 2001, 84, 67–77.

108. Mobashsher, A.T.; Abbosh, A.M. Artificial Human Phantoms: Human Proxy in Testing Microwave Apparatuses That Have Electromagnetic Interaction with the Human Body. *IEEE Microw. Mag.* 2015, 16, 42–62.

109. Hartsgrrove, G.; Kraszewski, A.; Surowiec, A. Simulated biological materials for electromagnetic radiation absorption studies. *Bioelectromagnetics* 1987, 8, 29–36.

110. Mashal, A.; Gao, F.; Hagness, S.C. Heterogeneous Anthropomorphic Phantoms with Realistic Dielectric Properties for Microwave Breast Imaging Experiments. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2011, 53, 1896–1902. [PubMed]

111. Yonebayashi, J.; Takamatsu, S.; Saito, K.; Takahashi, M.; Ito, K. Development of dynamic phantom for evaluation of breath detection doppler radar. In Proceedings of the 32nd Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society, Seoul, Korea, 13–18 June 2010.

112. Lubecke, O.B.; Ong, P.W.; Lubecke, V.M. 10 GHz Doppler radar sensing of respiration and heart movement. In Proceedings of the IEEE 28th Annual Northeast Bioengineering Conference, Philadelphia, PA, USA, 21 April 2002; pp. 55–56.

113. Song, R.; Wang, Q.; Mao, B.; Wang, Z.; Tang, D.; Zhang, B.; Zhang, J.; Liu, C.; He, D.; Wu, Z.; et al. Flexible graphite films with high conductivity for radio-frequency antennas. *Carbon* 2018, 130, 164–169.

114. Tang, D.; Wang, Q.; Wang, Z.; Liu, Q.; Zhang, B.; He, D.; Wu, Z.; Mu, S. Highly sensitive wearable sensor based on a flexible multi-layer graphene film antenna. *Sci. Bull.* 2018, 63, 574–579.

115. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

116. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепка – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.

117. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

118. Правила улаштування електроустановок. URL: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

119. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

120. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення/ URL [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)

121. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

122. 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. [http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14\\_nakazy\\_ta\\_rozpor\\_183575/248+58074-detail.html](http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14_nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html)

123. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97), МОЗ України. К., 1997.



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

**«Гнучка широкопугова антена для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж»**

08-36.МКР.001.00.000 ТЗ

Керівник роботи:  
\_\_\_\_\_ д. т. н., професор Семенов А.О.  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

Розробив студент гр. РТ-20м  
\_\_\_\_\_ Іванов О. 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 гнучкої широкопasmової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв інфокомунікаційних мереж 4G стандарту LTE-m1/NB-IoT.*

*Задачами досліджень магістерської кваліфікаційної роботи є:*

- провести аналіз сучасного стану розробки гнучких широкопasmових антен для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж.;
- провести літературний огляд теоретичних основ побудови гнучких широкопasmових антен;
- розробити варіанти гнучкої широкопasmової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв інфокомунікаційних мереж 4G стандарту LTE-m1/NB-IoT для діапазонів B3 і B20;
- здійснити дослідження спрямованих властивостей та частотних характеристик гнучкої широкопasmової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв інфокомунікаційних мереж 4G стандарту LTE-m1/NB-IoT для діапазонів B3 і B20;
- дослідити вплив виду та форми гнучкої широкопasmової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв інфокомунікаційних мереж 4G стандарту LTE-m1/NB-IoT для діапазонів B3 і B20.

## 3. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

1. B. Mohamadzade, R. M. Hashmi, R.B.V.B. Simorangkir, R. Gharaei, S.Ur.

- Rehman, Q.H. Abbasi. 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 міжнародної 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. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
  9. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепка – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.
  10. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
  11. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.

12. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
13. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
14. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

#### 4. ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки,  
студент групи РТ-20м з/в Іванов О.С.

#### 5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується реалізувати .

##### 5.1 Електричні параметри:

- Частотні діапазони В3 1800 МГц (DCS, Uplink 1710 - 1785 МГц, Downlink 1805 - 1880 МГц) та В20 800 МГц (Digital Dividend, Uplink 832 - 862 МГц, Downlink 791 - 821 МГц);
- Максимальна пікова потужність – 23 дБм
- Коефіцієнт корисної дії антени – не менше 0,5
- Коефіцієнт підсилення антени - 1
- ширина діаграми спрямованості – не менше 270°

##### 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 гнучкої широкосмугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж.
- Розроблено математичну модель гнучкої широкосмугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж.
- Результати комп'ютерного моделювання гнучкої широкосмугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж.
- Проведено результати дослідження гнучкої широкосмугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж.

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 гнучкої широкосмугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж;

- математичну модель конструкцію гнучкої широкосмугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж;
- результати комп'ютерного моделювання конструкцію гнучкої широкосмугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж;
- результати експериментальних досліджень конструкцію гнучкої широкосмугової антени для радіотехнологій доступу носимих пристроїв LTE інфокомунікаційних мереж;
- 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)

ГНУЧКА ШИРОКОСМУГОВА АНТЕНА ДЛЯ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ  
ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ LTE ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Комп'ютерне проектування гнучкої широкосмугової друкованої антени у про-  
грамі HFSS ANSYS





Додаток В  
(обов'язковий)

ГНУЧКА ШИРОКОСМУГОВА АНТЕНА ДЛЯ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ  
ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ LTE ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Результати моделювання спрямованих властивостей гнучкої широкосмугової  
друкованої антени у головних площинах



Додаток Д  
(обов'язковий)

ГНУЧКА ШИРОКОСМУГОВА АНТЕНА ДЛЯ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ  
ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ LTE ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Результати моделювання спрямованих властивостей гнучкої широкосмугової  
друкованої антени у просторі



Додаток Е  
(обов'язковий)

ГНУЧКА ШИРОКОСМУГОВА АНТЕНА ДЛЯ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ  
ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ LTE ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Ескізне креслення гнучкої широкосмугової друкованої антени



Додаток Ж  
(обов'язковий)

ГНУЧКА ШИРОКОСМУГОВА АНТЕНА ДЛЯ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ  
ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ LTE ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Результат моделювання частотної характеристики КСХ гнучкої широкосмугової друкованої антени





Додаток И  
(обов'язковий)

ГНУЧКА ШИРОКОСМУГОВА АНТЕНА ДЛЯ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ  
ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ LTE ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Фото експериментального зразка антени та вимірювального обладнання



Додаток К  
(обов'язковий)

ГНУЧКА ШИРОКОСМУГОВА АНТЕНА ДЛЯ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ  
ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ LTE ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Результати експериментальних досліджень КСХ широкосмугової гнучкої антени



Додаток Л  
(обов'язковий)

ГНУЧКА ШИРОКОСМУГОВА АНТЕНА ДЛЯ РАДІОТЕХНОЛОГІЙ  
ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ LTE ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Результати експериментальних досліджень гнучкої широкосмугової друкованої  
антени з використанням векторного аналізатора

