Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
(повне найменування закладу вищої освіти)
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
(повне найменування факультету)
Кафедра електроніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ АНТЕНИ ДЛЯ ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ 2300-2400 МГЦ

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF TELECOMMUNICATION ANTENNA CHARACTERISTICS FOR THE FREQUENCY RANGE OF 2300-2400 MHZ

спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)
освітня програма «Телекомунікації та радіотехніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕКРм-21
БАРТОШИК Олександр Васильович
_____
(підпис)
Керівник: к.т.н., доцент
ПРИСТУПА Станіслав Олексійович
_____
(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«_5_» грудня 2025 р.

Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент СЕЛЕПИНА Йосип Романович
_____
(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
Кафедра електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти: *магістр*
Галузь знань: *17 Електроніка та телекомунікації*
Спеціальність: *172 Телекомунікації та радіотехніка*
Освітня програма**:** *«Телекомунікації та радіотехніка»*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____
«_14_» __січня__2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

БАРТОШИКУ Олександру Васильовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи *Розробка і дослідження характеристик телекомунікаційної антени для діапазону частот 2300-2400МГц*
керівник роботи: *к.т.н., доцент .Приступа С.О.*
затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» січня 2025 р. № 20/01-02
2. Строк подання здобувачем роботи: 05.12.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи
Тип антени – мікросмужкова прямокутна патч-антена; діапазон часто – 2300-2400 МГц; чомінальна частота – 2350 МГц; Умови експлуатації: внутрішні приміщення, температура 0…+40 ℃.

-

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ
Розділ 1 Огляд телекомунікаційних антен та спектру 2300-2400 МГц
Розділ 2 Антенні технології сантиметрового діапазону та їх конструктивні особливості
Розділ 3 Моделювання мікросмужкової антени
Розділ 4 Виготовлення антени 2300-2400 МГц
Висновки
5. Перелік графічного матеріалу
10 слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Роздір 1	*Приступа С.О.*		
Розділ 2	*Приступа С.О.*		
Розділ 3	*Приступа С.О.*		
Розділ 4	*Приступа С.О.*		
Нормоконтроль	*Селепина Й. Р.*		
Гарант ОП	*Селепина Й. Р.*		
Показник запозичень тексту	*3,18 %*		
Академічна доброчесність	*Приступа С.О.*		

7. Дата видачі завдання 15.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	*Примітка*
1.	Огляд літератури із досліджуваної проблеми	до 10.09.2025 р.	
2.	Розділ 1	до 30.10.2025 р.	
3.	Розділ 2	до 07.10.2025 р.	
4.	Розділ 3	до 01.11.2025 р.	
5.	Розділ 4	до 15.11.2025 р.	
6.	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 15.12.2025 р.	
7.	Нормоконтроль	до 04.12.2025 р.	
8.	Інструментальна перевірка на академічний плагіат	до 05.12.2025 р.	
9..	Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту	до 30.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти _____ Бартошик О. В.

Керівник роботи _____ Приступа С. О.

АНОТАЦІЯ

Бартошик О. В. Розробка і дослідження характеристик телекомунікаційної антени для діапазону частот 2300-2400 МГц. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Телекомунікації та радіотехніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел.

У роботі розглянуто проблематику створення телекомунікаційних антен для сучасних систем бездротового зв’язку, що працюють у діапазоні частот 2300-2400 МГц. Проаналізовано особливості поширення електромагнітних хвиль у цьому спектрі, вимоги до антенних пристроїв та чинники, які впливають на формування діаграми спрямованості, коефіцієнт підсилення й узгодження з передавальним трактом. На основі теоретичних принципів та методів електродинамічного моделювання виконано проєктування конструкції антени з урахуванням параметрів підкладки, геометричних розмірів та робочої смуги частот.

Проведено моделювання електромагнітних характеристик, зокрема КСХ, коефіцієнта підсилення, діаграми спрямованості та ширини смуги узгодження. Отримані результати дозволили оцінити вплив геометрії та матеріалів на параметри антени та здійснити оптимізацію конструкції. Виконано аналіз отриманих характеристик і підтверджено можливість ефективного використання розробленої антени у телекомунікаційних пристроях, що функціонують у діапазоні 2300-2400 МГц. Показано відповідність параметрів антени вимогам до сучасних радіотехнічних систем та її перспективність для практичного застосування.

Ключові слова: бездротовий зв’язок, телекомунікаційна антена, мікросмужкова антена, діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення, узгодження.

ANNOTATION

Bartoszyk O. Development and Investigation of the Characteristics of a Telecommunication Antenna for the 2300-2400 MHz Frequency Range. Manuscript.

Master's Qualification Work, Educational Program «Telecommunications and Radio Engineering». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, and a list of references.

The work addresses the challenges of designing telecommunication antennas for modern wireless communication systems operating in the 2300-2400 MHz frequency range. The study analyzes the propagation characteristics of electromagnetic waves within this spectrum, the requirements for antenna devices, and the factors influencing radiation pattern formation, gain, and impedance matching with the transmission path. Based on theoretical principles and electromagnetic modeling methods, an antenna structure was developed considering substrate parameters, geometric dimensions, and the required operating bandwidth.

Electromagnetic characteristics – including VSWR, gain, radiation pattern, and impedance bandwidth – were simulated and evaluated. The obtained results made it possible to assess the influence of geometry and materials on antenna performance and to optimize the design accordingly. The analysis confirms the feasibility of effectively using the developed antenna in telecommunication devices operating in the 2300-2400 MHz range. The antenna parameters meet the requirements of modern radio communication systems and demonstrate strong potential for practical implementation.

Keywords: Wireless communication, Telecommunication antenna, Microstrip antenna, Radiation pattern, gain, Impedance matching.

ЗМІСТ стор.

ВСТУП……..… 7

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АНТЕН ТА СПЕКТРУ 2300-2400 МГЦ……... 9

1.1 Характеристика діапазону частот 2300-2400 МГц та сфери його застосування…..... 9

1.2 Параметри і характеристики антен…….. 10

1.3 Аналіз ринку антен діапазону частот 2300-2400 МГц……. 15

РОЗДІЛ 2 АНТЕННІ ТЕХНОЛОГІЇ САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ТА ЇХ КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ……. 20

2.1 Конструкції антен сантиметрових хвиль …… 20

2.2 Еквівалентна схема антени……. 27

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕНИ..……..….... 32

3.1 Програмний продукт для проектування та моделювання антен... 32

3.2 Опис антени…….. 46

3.3 Оптимізація параметрів антени…. 49

РОЗДІЛ 4 ВИГОТОВЛЕННЯ АНТЕННИ 2300-2400 МГц……..... 53

4.1 Програмне забезпечення для проектування друкованої плати антени……..……..…… 53

4.2 Розробка друкованої плати……...…… 54

4.3 Виготовлення антени фоторезистивним методом…….. 56

4.4 Розробка і виготовлення корпуса антени…… 58

4.5 Аналіз реальних параметрів розробленої антени..... 61

ВИСНОВКИ…… 64

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..…… 65

ДОДАТКИ……... 67

ВСТУП

Стрімкий розвиток систем бездротового зв’язку зумовлює зростання вимог до антенних пристроїв, які забезпечують ефективне передавання та приймання радіосигналів у різних частотних діапазонах. Збільшення обсягів переданої інформації, впровадження стандартів нового покоління та розширення спектра телекомунікаційних послуг вимагають застосування антен із високою енергетичною ефективністю, компактними габаритами та стабільними характеристиками в заданому діапазоні частот.

Діапазон 2300-2400 МГц є одним із важливих сегментів сучасного радіочастотного ресурсу, що використовується у технологіях LTE, WiMAX, приватних бездротових мережах та інших телекомунікаційних системах. Антени, які працюють у цьому спектрі, повинні мати достатній коефіцієнт підсилення, надійне узгодження з трактом живлення та передбачувану діаграму спрямованості. Особливого значення набувають конструкції на основі мікросмужкових технологій, оскільки вони поєднують невеликі розміри, технологічність виготовлення та можливість інтеграції з друкованими платами сучасних пристроїв.

Актуальність роботи полягає у необхідності створення антени, що забезпечує стабільну роботу в діапазоні 2300-2400 МГц та відповідає вимогам до телекомунікаційного обладнання. Для цього потрібно дослідити електромагнітні процеси, що визначають роботу антени, розробити її конструкцію та підтвердити працездатність шляхом моделювання та аналізу характеристик.

Метою роботи є розробка та дослідження телекомунікаційної антени для діапазону частот 2300-2400 МГц.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні завдання:

– проаналізувати особливості функціонування антен у зазначеному частотному діапазоні;

– обґрунтувати вибір типу антени та визначити вимоги до її параметрів;

– розробити конструкцію антени з урахуванням технологічних та

електродинамічних обмежень;

– виконати моделювання електромагнітних характеристик та провести їх аналіз;

– оцінити можливість практичного застосування розробленої антени.

Об’єктом дослідження є телекомунікаційні антени сантиметрового діапазону.

Предметом дослідження – електромагнітні характеристики та конструктивні особливості мікросмужкової антени для діапазону 2300-2400 МГц.

Наукова новизна полягає в оптимізації конструкції мікросмужкової антени для діапазону 2300-2400 МГц із урахуванням впливу геометричних параметрів і властивостей підкладки на її електромагнітні характеристики. Запропонований підхід забезпечує покращене узгодження та підвищений коефіцієнт підсилення в робочому діапазоні частот.

Окремі результати роботи були представлені у тезах доповіді: Герман Б. А. , Бартошик О. В., Цюпящук Я. В. Дистанційне керування сигналізацією за допомогою модуля GSM. XIII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». м. Луцьк. ІВВ ЛНТУ, 28 листопада 2025 року. С. 117-121 (додаток А).

РОЗДІЛ 1
ОГЛЯД ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ АНТЕН ТА СПЕКТРУ 2300-2400 МГЦ

1.1 Характеристика діапазону частот 2300-2400 МГц та сфери його застосування

Діапазон 2300-2400 МГц (іноді позначають як S-band у широкому сенсі) є міжнародно визнаним діапазоном, що у Таблиці радіочастотних розподілів ITU виділений для фіксованих і мобільних сервісів на первинній основі. Через таке розподілення цей діапазон підходить для впровадження систем рухомого зв'язку (IMT), а також для фіксованих безпровідних ланок. Зокрема, міжнародні рекомендації та рішення регуляторів враховують можливість використання діапазону для технологій типу TD-LTE / LTE-TDD [1].

У практичному застосуванні 2300-2400 МГц використовують для наступних видів систем:

– мобільні широкосмугові мережі (LTE TDD, 3GPP Band 40);

– системи фіксованої бездротової передачі даних (Fixed Wireless Access, FWA);

– WiMAX (стандарт IEEE 802.16 для 2,3 GHz), а також для спеціалізованих корпоративних приватних мереж і систем машинного зв'язку (наприклад, IoT / M2M у приватних кластерах).

Розподіл і практичні впровадження залежать від національної політики частотного планування [2].

Оскільки 2,3 ГГц – це відносно високі сантиметрові частоти, вони дають хорошу пропускну здатність у порівнянні з нижчими діапазонами (наприклад 800-900 МГц), але забезпечують менше покриття і проникнення крізь перешкоди за однакової потужності. Тому діапазон 2300-2400 МГц часто використовують для зон із великою щільністю трафіку (міські райони, «гарячі точки») або для фіксованих конфігурацій точка-точка і точка-багатьох, де важливі ширина смуги та пропускна здатність.

Питання суміжності та співіснування у багатьох регіонах безпосередньо

прилягає до ISM-діапазону 2400-2483,5 МГц, а у деяких країнах – до локальних служб (наприклад, WCS у США). Тому при плануванні мереж у межах 2300-2400 МГц слід враховувати ризики взаємних перешкод із сусідніми службами та необхідність координування випромінювань, захисних смуг і фільтрації. На національному рівні виділення смуг під мобільні оператори або приватних користувачів супроводжується ліцензуванням та правилами експлуатації – як це зроблено, наприклад, в європейських країнах та безпосередьо в Україні [3].

У нормативних документах України зазначений діапазон також закріплений як перспективний для мобільного зв'язку і високошвидкісної передачі даних. У відкритих джерелах НКРЗІ наведені матеріали щодо розподілу смуг та параметрів використання 2300-2400 МГц для телекомунікаційних систем. Це створює практичну базу для впровадження сучасних технологій у мережах операторів і приватних корпоративних сегментах [4].

1.2 Параметри і характеристики антен

Як відомо, [5] антенною називається пристрій, призначений для випромінювання або прийому радіохвиль. Антени мають властивість оборотності. Принципово будь-яка антена може працювати в якості приймального і передавального пристроїв. Наприклад, у радіорелейному зв'язку одна антена за допомогою фільтрів підключається до кількох передавачів та приймачів, що працюють одночасно в одному напрямку, але на різних частотах. Залежно від призначення антени поділяються на приймальні, передавальні та приймальнопередавальні. На підставі принципу взаємності доводиться, що параметри антени, що працює на прийом, не відрізняються від відповідних параметрів антени, що працює на передачу.

Одним з основних параметрів антени є діаграма спрямованості, яка характеризує залежність амплітуди випромінюваного поля від кутових координат, коли не змінюється відстань між антеною та точкою

спостереження. Діаграми спрямованості являють собою двомірний перетин тривимірної діаграми.

Антени будь-якого типу характеризуються властивістю оборотності, тобто здатні працювати як у режимі прийому, так і у режимі випромінювання. У радіорелейних системах нерідко використовується одна й та сама антена, яка одночасно підключається до передавача і приймача. Це дає змогу здійснювати приймання та передавання сигналів в одному напрямку, але на різних частотах.

Більшість характеристик приймальної антени збігаються з параметрами передавальної, хоча в окремих випадках вони мають інше фізичне трактування.

Попри принцип подвійності, приймальні й передавальні антени можуть суттєво відрізнятися за конструкцією. Це зумовлено тим, що передавальна антена повинна витримувати значні потужності для випромінювання електромагнітної енергії на максимально можливі відстані. Натомість у режимі прийому антена взаємодіє з електромагнітними полями дуже малої напруженості. Тип і особливості передавальної конструкції антени часто визначають її остаточні габаритні розміри.

Основна характеристика будь якої антени це – діаграма спрямованості (ДС). З неї випливає безліч допоміжних параметрів і такі важливі енергетичні характеристики як коефіцієнт підсилення і коефіцієнт спрямованої дії. Визначеннння діаграми спрямованості звучить наступним чином: це безпосередньо залежність напруженості поля, створюваного антеною на досить великій відстані, від кутів спостереження в просторі.

Просторова ДС є поверхнею обсягу та може мати кілька максимумів. У стаціонарних антенах ДС часто розглядають у вертикальній та горизонтальній площинах. Діаграми спрямованості є нормованими в полярній або прямокутній системі координат [5].

На рисунку 2.1 подано визначення ширини головної пелюстки ДС за нульовим випромінюванням $2\varphi_0$ і рівнем $0{,}5\varphi_{0,5}$ максимальної щільності потоку потужності, що відповідає рівню 0,707 за напруженістю поля.

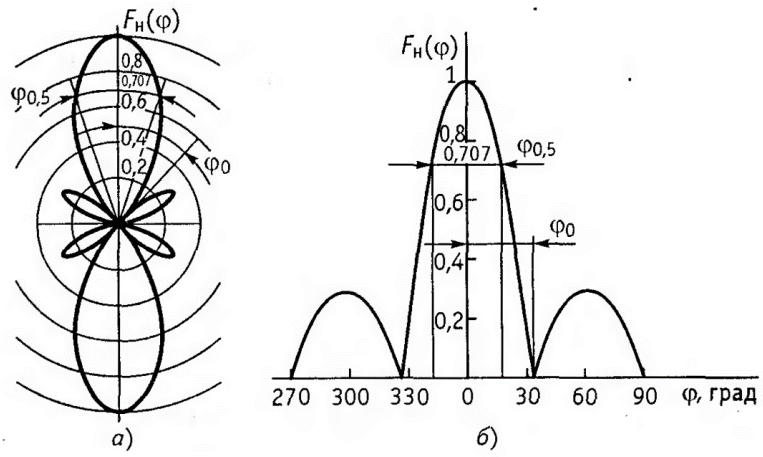


Рисунок 1.1 – Визначення ширини діаграми спрямованості у різних системах координат: а) полярна система координат; б) – прямокутна система координат

Коефіцієнтом спрямованої дії (КСД) D у цьому напрямку називають відношення квадрата напруженості поля, створюваного антеною в даному (зазвичай головному) напрямку E_0^2, до середнього значення квадрата напруженості поля по всіх напрямках $E_{ср}^2$. Це виражено у формулі (1.1).

$$D = \frac{E_0^2}{E_{ср}^2} \tag{1.1}$$

Чисельне значення КСД показує, в скільки разів необхідно зменшити потужність випромінювання при заміні ненаправленої антени спрямованої для збереження колишньої напруженості поля в головному напрямку.

Перебуваючи в полі електромагнітної хвилі, приймальна антена поглинає частину її енергії і за допомогою фідера передає приймач, що є для антени навантаженням. Ефективною площею приймальної антени називають еквівалентну площу, з якої може бути віддана максимальна потужність радіохвилі у погоджене навантаження. Ефективна площа антени $S_{еф}$ пов'язана з КСД та довжиною хвилі співвідношенням (1.2).

$$S_{еф} = \frac{D\lambda^2}{4\pi}. \tag{1.2}$$

Діючою довжиною передавальної антени L_D називають довжину випромінювання з рівномірним розподілом струму, що у головному напрямі створює таку ж напруженість поля, як реальна антена при однакових струмах. Діючою довжиною приймальної антени називають відношення ЕРС в антені, наведеної радіохвильою, що приходить з напрямку головної пелюстки ДС E_a, до напруженості поля в місці прийому. Це виражено у формулі (1.3).

$$L_D = \frac{E}{E_a} \tag{1.3}$$

Потужність P_a ,що підводиться до антени частково випромінюється P_Σ і частково нескінченно втрачається P_B на нагрівання провідників та ізоляторів антени, Землі та інших навколишніх предметах. Потужність втрат в антені визначається за виразом (1.4).

$$P_B = I^2 R_B \tag{1.4}$$

де R_B – еквівалентний опір втрат.

Аналогічно можна записати вираз для потужності випромінювання (1.5).

$$P_\Sigma = I^2 R_\Sigma \tag{1.5}$$

Опором випромінювання антени R_Σ називають відношення потужності випромінювання до квадрата ефективного значення струму в антені (1.6).

$$R_\Sigma = \frac{P_\Sigma}{I^2} \tag{1.6}$$

Потужність, що випромінювана антеною є корисною потужністю, отже, і опір випромінювання є корисним активним опором антени на відміну від

опору втрат, який бажано по можливості мати найменшим.

Параметром, що враховує спрямовані властивості та втрати в антені, є коефіцієнт підсилення. Коефіцієнтом підсилення антени G називають відношення щільності потоку потужності або квадрата напруженості поля E_0^2, створеного антеною в даному (зазвичай головному) напрямку, до потоку або квадрату напруженості поля $E_{0э}^2$, створеному еталонною антеною в головному напрямку при рівності потужностей, що підводяться до антени:

$$G = \frac{E_0^2}{E_{0э}^2} \tag{1.7}$$

Коефіцієнт підсилення є одним з визначальних параметрів передаючих антен. Він показує, у скільки разів потрібно зменшити потужність, що підводиться до спрямованої антени, в порівнянні з еталонною, щоб напруженість поля в головному напрямку була однакова.

Хвильовий опір антени (вібратора) W_B визначають відношенням напруги $U_{пад}$ до струму $I_{пад}$ біжучої (падаючої) хвилі і може бути виражено через її параметри (1.8).

$$W_B = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \tag{1.8}$$

де L_1 і C_1, відповідно індуктивність, Гн / м, і ємність, Ф / м, антени на 1 м довжини.

Вхідним опором антени називають відношення напруги до струму на вході антени. У загальному випадку цей опір є комплексним $Z_{\text{а}} = R_{\text{а}} + iX_{\text{а}}$ і залежить від відносної довжини λ антени.

Коефіцієнтом корисної дії антени $\eta_{\text{а}}$ називають відношення випромінюваної потужності P_Σ до підведеної P_A.

$$\eta_a = \frac{P_\Sigma}{P_A} = \frac{P_\Sigma}{P_\Sigma + P_П} \quad (1.9)$$

Зазвичай під величиною коефіцієнта підсилення розуміють його максимальне значення

Коефіцієнт підсилення використовується для розрахунку поля випромінювання за відомими величинами потужності, що підводиться до антени і ККД.

Найбільша величина випромінюваної антеною потужності, при якій ще не відбувається електричний пробій, називається допустимою потужністю випромінювання.

1.3 Аналіз ринку антен діапазону частот 2300-2400 МГц

Ринок антен загалом (включно з базовими станціями, малими сотами, DAS, активними антенами й OEM-антенами) продовжує зростати під впливом розгортання мобільних мереж, потреб у приватних LTE/5G рішеннях і проєктах покриття в будівлях. Пристрої та рішення, які покривають діапазони навколо 2,3-2,4 ГГц (LTE Band 40 і суміжні смуги), входять до сегментів «base-station / small cell / MIMO client» і користуються стабільним попитом як у регіонах з активними розгортаннями, так і в ринках з потребою покриття для індустріальних / приватних мереж. Зростання ринку базових антен і RF-рішень підтверджується кількома галузевими звітами й оцінками [6].

Комплект Sota PL12 MIMO 2×2 (рис. 1.2) – це приклад сучасного підходу до підсилення мобільного зв’язку у ситуаціях, коли базова станція доступна, але якість сигналу нестабільна, швидкість низька або з’єднання переривчасте. Панельна конструкція робить цю антену компактною, акуратною у встановленні та стійкою до впливу зовнішнього середовища, а широкий робочий діапазон частот 698-2700 МГц дозволяє їй працювати з мережею майже будь-якого оператора та на будь-якому стандарті – від GSM до LTE. Вона відчуває себе однаково впевнено як у діапазонах, що

використовуються для голосового зв’язку, так і у частотах, на яких передається 4G-інтернет [6].

Рисунок 1.2 – Планшетна антена Sota PL12 MIMO 2*2 [6]

Основа конструкції – двоканальна MIMO-архітектура, що забезпечує антені перевагу над одноантенними рішеннями: два незалежні канали підвищують стійкість з’єднання та дозволяють модему працювати з більшою пропускною здатністю. Sota PL12 призначена для роботи у вертикально- та горизонтально-змішаних поляризаціях ±45°, а це означає, що вона здатна приймати та передавати сигнал у складних умовах відбиттів, переорієнтацій хвиль і нерівномірного середовища. У реальному застосуванні це часто відчувається у вигляді стабільнішого пінгу та меншої кількості просідань швидкості навіть тоді, коли оператор завантажений.

Завдяки підсиленню близько 10-12 dBi у всьому діапазоні частот, антена не є ультраспрямованою, проте має достатню енергетику для значного покращення прийому на середніх дистанціях від базової станції. Вона легко

монтується на щоглі, фасаді або даху – корпус із UV-захищеного пластику стійкий до сонця та опадів, а металева фурнітура витримує довготривалу експлуатацію. Її форма та конструкція балансують між підсиленням і шириною діаграми спрямованості, що робить її хорошим вибором для типового житлового або дачного використання, коли потрібно не вузьке прицільне наведення, а стабільне розширення зони прийому.

Невід'ємним елементом комплекту є два коаксіальні кабелі довжиною близько десяти метрів та пігтейли, за допомогою яких антену можна відразу під'єднати до модему або роутера. Це головна зручність Sota PL12 – покупцю не потрібно шукати перехідники або окремо замовляти кабельні збірки. Водночас така довжина кабелю, хоч і спрощує монтаж, може бути джерелом помірних втрат при передачі сигналу, тому максимальний ефект антена демонструє тоді, коли встановлена якнайближче до місця введення лінії у будинок.

Sota PL12 зручна тим, що не вимагає глибокої технічної підготовки від користувача. У більшості випадків достатньо лише правильно зорієнтувати її у бік найближчої станції оператора та під'єднати до MIMO-модему. Там, де рівень мережі без антени знаходився на межі прийнятного, її застосування часто означає перехід від нестабільного інтернету до стійкого з'єднання зі швидкістю, придатною для відеозв'язку, потоків та роботи онлайн. Саме у цьому криється цінність цієї моделі – вона не націлена на рекорди підсилення, її сила у практичності, універсальності та готовності до роботи «з коробки».

Таким чином, Sota PL12 MIMO 2×2 – це не просто антена, а продумане рішення для тих, хто хоче стабільно користуватися інтернетом у приватному будинку, на дачі чи в сільській місцевості, без складних налаштувань та додаткових витрат. Вона поєднує широкочастотність, MIMO-структуру та повний комплект підключення.

Панельна антена AX-2415P [7] призначена для використання у комплекті. обладнання бездротових систем передачі даних стандарту IEEE 802.11b та в інших мережах передачі даних, що працюють на частотах 2300-2500 МГц.

Зовнішній вигляд антени представлений на рисунку 1.2. У таблиці 1.2 подано основні параметри антени, що надаються виробником.

Таблиця 1.2 – Параметри антени АХ -2415Р

Параметр	Значення
Робочий діапазон частот	2300-2500 МГц
Вхідний опір	50 Ом
Коефіцієнт підсилення	15 дБ
Поляризація	Лінійна
КСХ, не більше	1,5
Вага нетто	0,9 кг
Габарити (ДхШхВ)	240х240х90 мм

Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд антени АХ -2415Р [7]

Антена АХ-2415Р має секторну діаграму спрямованості. Подібні антени найкращим чином підходять для організації каналів зв’язку «точка-точка» та «точка-багатоточка».

Антена АХ-2415Р – синфазна антена, виготовлена в герметичному

радіопрозорому корпусі. Антена універсального застосування: може бути встановлена як всередині приміщень, так і зовні. Стійка до різних погодних умов, не вимагає технічного обслуговування протягом усього терміну експлуатації. При монтажі на заземленій опорі антена АХ-2415Р не вимагає обов'язкового використання грозозахисних пристроїв.

Однак, при великій довжині з'єднувального кабелю, а також при невипадковому заземленні щогли антени, рекомендується використовувати грозозахист або заземлити корпус антени за допомогою мідного проводу перетином не менше 6 мм. Місце посадки дроту заземлення на корпус передбачено конструкцією антени. [5]

РОЗДІЛ 2
АНТЕННІ ТЕХНОЛОГІЇ САНТИМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ТА ЇХ КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ

2.1 Конструкції антен сантиметрових хвиль

Перші стільникові телефони створювали з зовнішніми штировими антенами. Проблема в ті часи полягала в тому, що звичайна антена в формі прямого стрижня при роботі на частоті 900 МГц повинна мати довжину, рівну 83 мм. Зі зрозумілих причин таку довгу антену було важко розмістити в корпус мобільного телефону, тому розробники штучно вкоротили антену до прийнятних розмірів, зберігаючи при цьому незмінні її електричні характеристики. Найбільш ефективний спосіб вирішення цього завдання – заміна прямолінійних провідників спіральними, що згорнуті в кручену лінію. Відомо, що швидкість поширення електромагнітної хвилі вздовж осі провідної спіралі завжди менше швидкості світла, тому при постійній частоті довжина хвилі сигналу в такій структурі буде менше його довжини хвилі у вільному просторі.

Уповільнюючі властивості спіральних структур дозволяють зменшити довжину резонансної антени в десятки разів, не змінюючи її електричні габарити (рис.2.1). Ось чому вибір часто падає саме на спіральний монополь. правда, в такому випадку конструкторам доводиться миритися з певними втратами (в тому числі зі зниженням коефіцієнта корисної дії на 5-10%), але ці втрати компенсує комфорт в експлуатації [8].

а) б)

Рисунок 2.1 – Вид спіральної (а) і чвертьхвилевідної (б) антен на резонансну частоту 868 МГц

Коли з’явилася необхідність в двохчастотному режимі роботи антени, почали застосовувати спіральну несиметричну антени приклад якої показаний на рисунку 2.2. Така антена здатна працювати в двох діапазонах 900 і 1800 МГц. Для роботи на низьких частотах спіраль має довжину рівну одній четвертій довжини робочої хвилі, а для роботи на високій частоті у антени змінювався кут нахилу або діаметр.

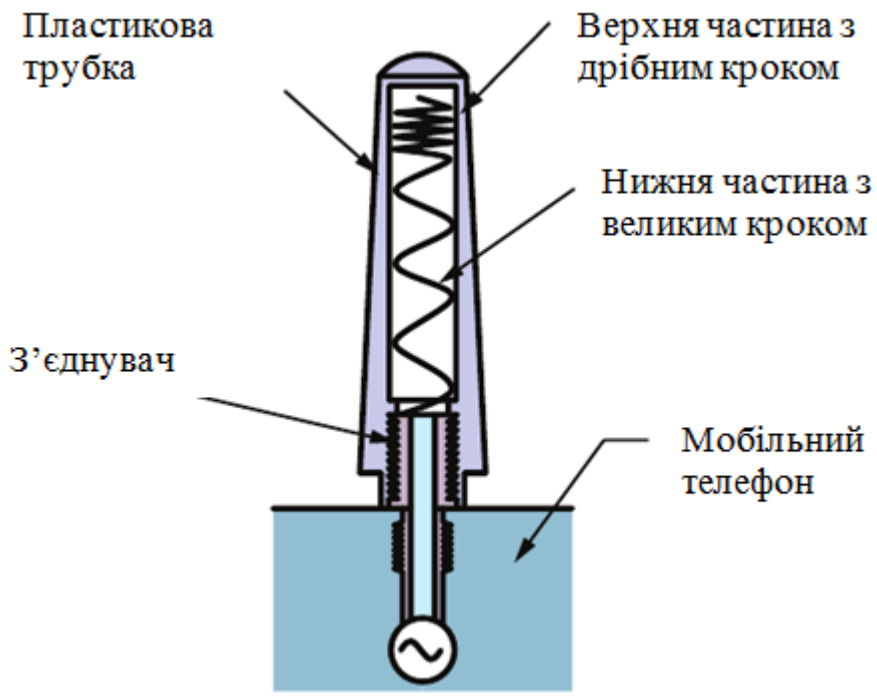


Рисунок 2.2 – Зовнішня антена стільникового телефону [8]

Досить високий ККД і низька вартість виробництва дозволили вбудувати ці антени в мільйони стільникових телефонів по всій планеті. Головною проблемою такої антени був малий діапазон робочих частот, що спричинило до зміни способу накручування спіралі. Характер випромінювання у такої антени був так само небезпечний для власника телефону [3].

Наступним кроком у розвитку вбудованих антен стільникових телефонів, була inverted L-antenna (ILA). На рисунку 2.3 схематично зображено вигляд такої антени.

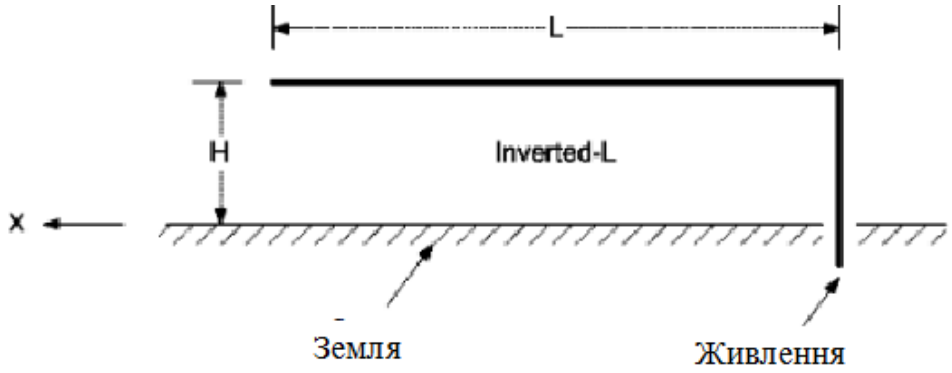


Рисунок 2.3 – Антена L типу

Антена типу ILA є монополем, сполученим з дротовим горизонтальним елементом, що розташований над екраном і діє як ємнісне навантаження.

Основоположним у виборі такої конструкції є її простота виконання і дешевизна матеріалів з яких вона виготовляється.

Діаграма спрямованості (ДС) L-вібратора практично ідентична з ДС короткого монополя. Як відомо, ДС монополя має максимум в напрямку перпендикулярному його осі, будучи, до того ж, всенаправленним. Що стосується L-вібратора, то ненульовий потенціал в його горизонтальному плечі трохи змінює ДС цієї антени, тим самим спотворюючи її всенаправленість. Вхідний імпеданс такої антени схожий зі вхідним імпедансом того ж короткого монополя: низький активний і високий реактивний опори.

Наступним кроком у розвитку антен стала перевернута F-подібна антена (рис. 2.4), яка є по суті парою з двох L-подібних вібраторів різної довжини. Подача сигналу у такій антені відбувається через внутрішню вертикальну секцію, а зовнішня вертикальна стійка антени навантажена на корпус.

«Введення додаткового L-сегмента забезпечило гнучке управління значенням вхідного опору антени і суттєво спростило її узгодження.

Змінюючи відстань S між вертикальними секціями, можна домогтися прийнятного значення реактивного опору антени. Значення S практично не впливає на резонансну частоту такого випромінювача, і за рахунок поліпшеного узгодження антени на резонансній частоті коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі КСХН (VSWR) може бути менше 2» [3].

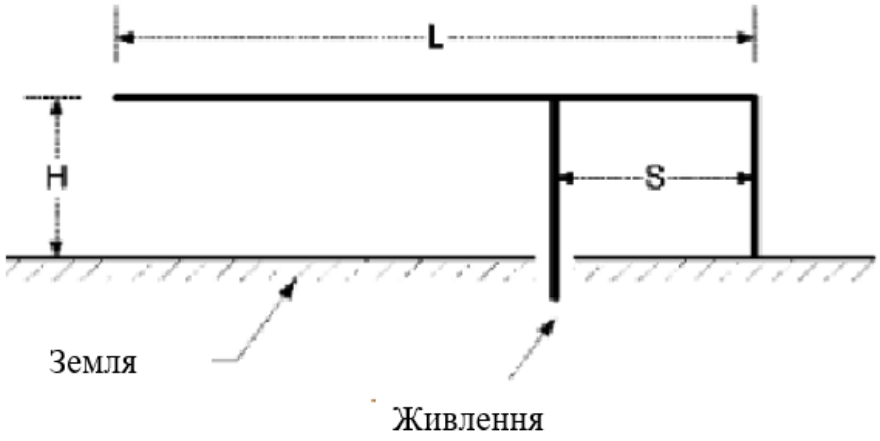


Рисунок 2.4 – Антена F типу

На рисунку 2.5 показана частотна залежність VSWR IFA, що має розміри: h = 2,28 см, L = 7,2 см, радіус проводніка 0,15 см, S = 0,68 см. Ширина робочої смуги частот цієї антени становить 1,5%.

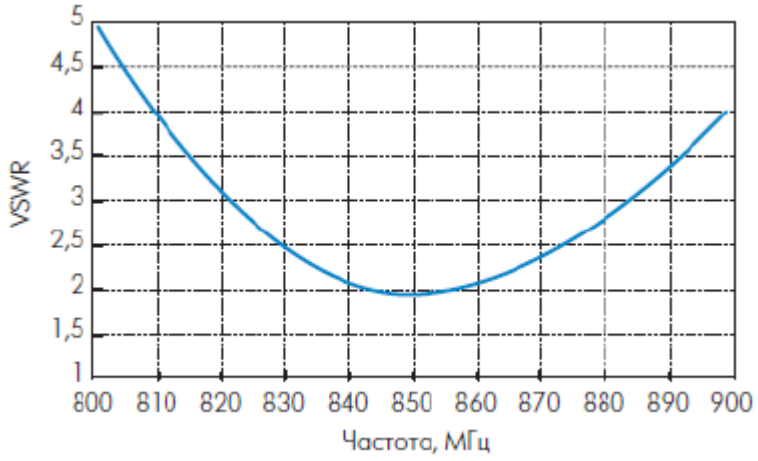


Рисунок 2.5 – Частотна залежність VSWR IFA антени [9]

Незважаючи на відносну простоту виготовлення IFA, оптимальний дизайн такий антени не єдиний. Варіюючи висоту випромінювача і довжину горизонтальної частини, можна змінювати електричні характеристики IFA, в тому числі і ширину смуги частот. Слід відзначити, що ширина робочої смуги частот у антен такого типу становить близько 2%, що значно більше, ніж у L-вібраторів.

Однак, така смуга частот все ж не відповідає сучасним вимогам. Розширення смуги робочих частот вимагає певної модифікації антени.

Наступним кроком розвитку таких антен послужили планарні перевернуті F-подібні вібратори.

Планарна F-подібна антена (PIFA – Planar Inverted-F Antennas) – найбільш поширена на сьогоднішній день різновид мікрострічкової антени.

Причина популярності антен PIFA пояснюється рядом її переваг:

– широка смуга робочих частот (до 10% від резонансної частоти);

– малі габарити і підтримка багатодіапазонності;

– відносно високе підсилення як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах поляризації.

Конструкція антени типу PIFA показана на рисунку 2.6.

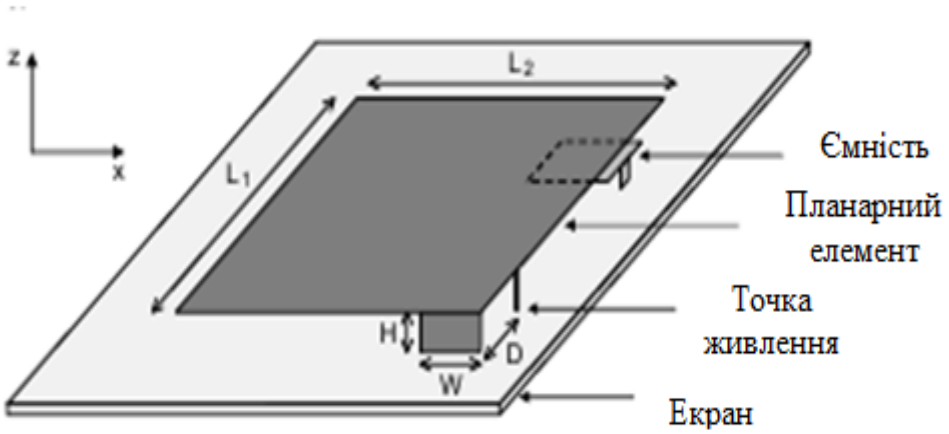


Рис. 2.6 – Конструкція планарної F-подібної антени [10]

Електричні характеристики PIFA антени залежать від розмірів верхньої випромінювальної пластини, співвідношення довжин її сторін L_1 і L_2, висоти цієї пластини над екраном H, розміру вертикальної заземляючої стінки W і розташування точки живлення антени.

Невеликі габарити антени PIFA характеризуються тим, що її резонансна частота f_0, визначається за рівнянням (2.1), приблизно дорівнює напівпериметру горизонтальної випромінювальної пластини:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda}. \qquad (2.1)$$

Слід зазначити, що резонансна довжина хвилі залежить від розмірів конструкції антени і обчислюється за формулами наведеними в таблиці 1.2 [14].

Якщо ширини вертикальної заземляючої пластини W і довжини сторони L_2, що контактує з планарним елементом в ній, збігається то забезпечується найбільша смуга пропускання PIFA антени. Крім того, ширина вертикального елемента впливає на поляризацію випромінювання / прийому.

Таблиця 1.2 – Формули для розрахунку резонансної частоти антени PIFA

Умова	Резонансна довжина хвилі
$W = 0$	$\frac{\lambda}{4} = L_1 + L_2 + H$
$\frac{W}{L_2} = 1$	$\frac{\lambda}{4} = L_1 + H$

Подальше збільшення смуги пропускання антени можна досягти за допомогою впровадження в конструкцію антени додаткової горизонтальної пластини (другого поверху), вона віддаляється на висоту h_1 від екрану (рис. 2.7). У такій подвійній антені використовувалися загальні для двох поверхів фідер і замикаюча пластина.

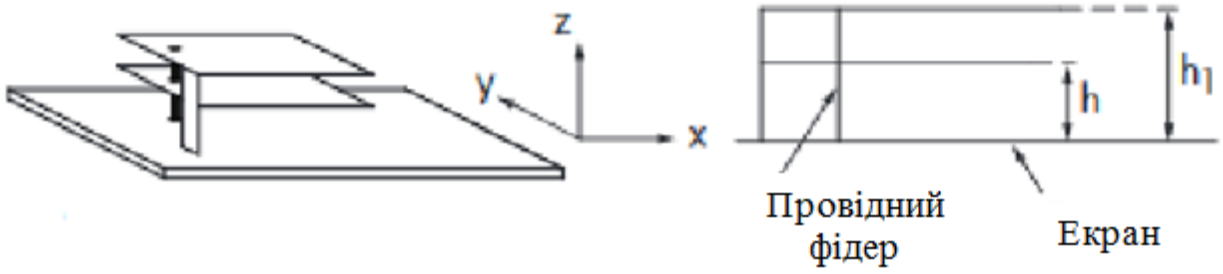


Рисунок 2.7 – Конструкція подвійної антени типу PIFA [10]

Для того щоб знайти імпеданс антени, можна використовувати схему наступну еквівалентну схему на рисунку 2.8

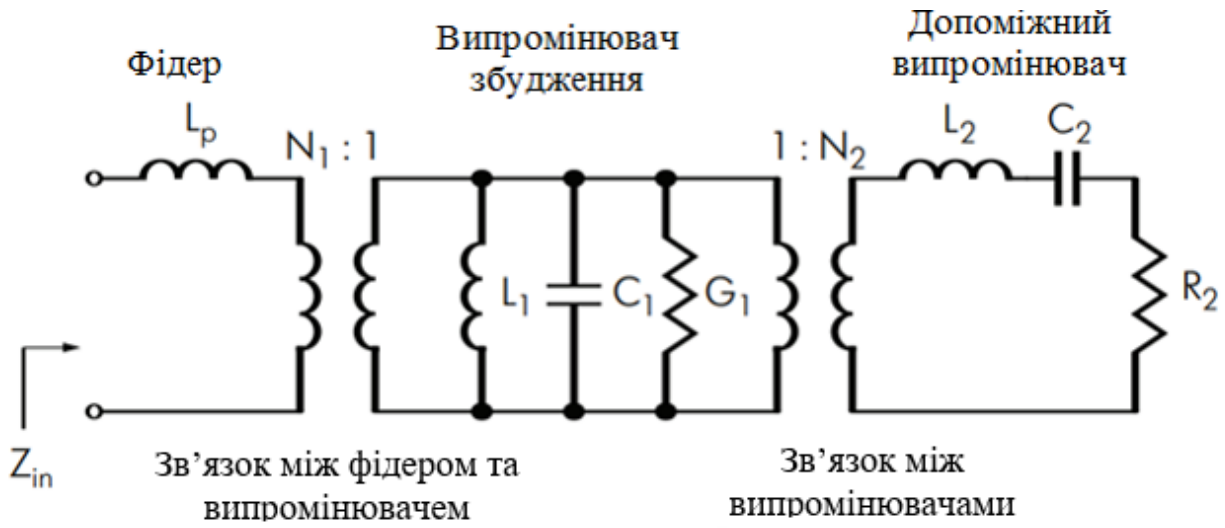


Рисунок 2.8 Еквівалентна схема антени типу PIFA [10]

Зі схеми видно, що другому поверху відповідає ємнісний елемент, який включений послідовно, це обумовлюється відсутністю фідерного контакту. Визначивши смугу пропускання можна знайти граничне значення δF через середньоквадратичне значення частоти (2.2)

$$\partial F = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\sqrt{\omega_1 \omega_2}}. \qquad (2.2)$$

Великі габарити є основним недоліком розглянутих PIFA антен. Тому поки що більш широке поширення отримав метод розширення смуги пропускання розглянутого типу антен за рахунок фрезерування в горизонтально розташованої пластини прорізів різної геометрії.

В ході еволюції, багатодіапазонні антени PIFA для мобільних засобів зв'язку перетворилися в складну антенну систему, що складається з декількох взаємопов'язаних активних і пасивних елементів.

Різноманіття комбінацій різних по конструкції сегментів в єдиній антенній системі стала основою радіотехнічних засобів зв'язку. Передовими конструкціями є різноманітні PIFA-конструкції, в тому числі з інтегрованими мікрополосковими і діелектричними резонансними антенами.

2.2 Еквівалентна схема антени

Антени типу PIFA (Planar Inverted F-Antenna) внаслідок своєї компактності і досить хороших електричних параметрів широко використовуються в пристроях зв'язку. Вона складається з металевого екрану, над яким паралельно йому розташована металева пластина, яка відіграє роль випромінювального елемента. Один край пластини з'єднаний з екраном металевою смужкою. Збудження антени здійснюється продовженням внутрішнього провідника коаксіальної лінії, що розташований на деякій відстані від металевої смужки.

Проектування антени типу PIFA доцільно вести в кілька етапів. Перший етап – попереднє проектування на основі еквівалентної схеми антени. Другий – уточнення отриманих параметрів за допомогою електродинамічного моделювання. Третій етап – оптимізація конфігурації антени. Нарешті, четвертий етап – створення експериментальних макетів антени і їх дослідження.

Аналіз і методика проектування антен типу PIFA розглядаються у багатьох публікаціях, наприклад, в [10-12]. Найбільш докладно ця методика викладена в роботі. Зокрема, резонансна довжина хвилі антени визначається за наступними формулами:

$$\frac{F}{W}\frac{1}{L+h}+\left(1-\frac{F}{W}\right)\frac{1}{L+h+W-D}=\frac{4}{\lambda},\ \text{якщо}\ 0<F/W<1, W/L\le 1; \quad (2.1)$$

$$\left(\frac{F}{W}\right)^{W/L}\frac{1}{L+h}+\left[1-\left(\frac{F}{W}\right)^{W/L}\right]\frac{1}{L+h+W-D}=\frac{4}{\lambda},\ \text{якщо}\ 0<F/W<1, W/L>1. \quad (2.2)$$

У цих виразах $\lambda=\lambda_0/\sqrt{\varepsilon_r}$ – довжина хвилі в діелектрику, що заповнює простір між металізацією і антеною, ε_r – відносна діелектрична проникність діелектрика. Однак в першому наближенні можна розглядати антену як

чвертьхвильовий несиметричний вібратор. У цьому наближенні:

$$\lambda_0 = 4\sqrt{\varepsilon_r} L\,. \tag{2.3}$$

У цьому наближенні її опір випромінювання визначається за (2.4)

$$R_r = 10\left(kL\right)^4 \Big/ \sin^2 kL\,. \tag{2.4}$$

Таким чином, PIFA можна уявити еквівалентною схемою у вигляді паралельного коливального контуру (рис. 2.9), збудження якого здійснюється портом, включеним за автотрансформаторною схемою між частинами індуктивності контуру L_1 і L_2.

Резонансна довжина хвилі антени

$$\lambda_0 = 2\pi c\sqrt{L_\Sigma C}, \tag{2.5}$$

де c – швидкість світла у вакуумі;

$L_\Sigma = L_1 + L_2$ індуктивність контуру.

Інший параметр коливального контуру – його хвильовий (характеристичний) опір

$$\rho = \sqrt{L_\Sigma / C}, \tag{2.6}$$

З (2.5) и (2.6) випливає, що

$$L_\Sigma = \frac{\lambda_0 \rho}{2\pi c}, \tag{2.7}$$

$$C = \frac{\lambda_0}{2\pi c \rho}. \tag{2.8}$$

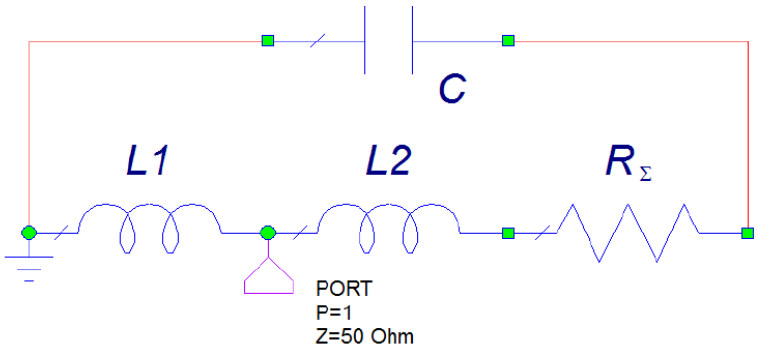


Рисунок 2.9 – Еквівалентна схема антени типу PIFA [11]

У першому наближенні ємність контуру можна розрахувати, як ємність плоского конденсатора, утвореного антеною і металізацією друкованої плати:

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{h}, \tag{2.9}$$

де S – площа антени,

h – відстань від антени до металізації.

Тоді формули (2.7) і (2.6) дозволять визначити індуктивність контуру і його хвильовий опір. Послідовний опір контуру можна прийняти рівним опору випромінювання: $R_\Sigma = R_r$. В цьому випадку еквівалентний опір контуру при резонансі

$$R_e = \frac{\rho^2}{R_r}. \tag{2.10}$$

Добротність паралельного коливального контуру визначається виразом

$$Q = \frac{R_e}{\rho} = \frac{\rho}{R_\Sigma}, \tag{2.11}$$

З іншого боку, добротність пов’язана з шириною смуги пропускання контуру Δf співвідношенням

$$Q = \frac{f}{\Delta f} \tag{2.12}$$

Таким чином, знаючи добротність і хвильовий опір контуру, за допомогою (2.11) можна визначити його еквівалентний опір.

Положення збуджуючого елемента (порту) має забезпечувати узгодження генератора з навантаженням (антеною). Розглядаючи послідовне з'єднання індукторів L_1 і L_2 як автотрансформатор, запишемо

$$R_{in} = R_e \left(\frac{L_1}{L_1 + L_2} \right)^2. \tag{2.13}$$

В умовах узгодження вхідний опір $R_{in} = Z_0$, де Z_0 – вхідний опір порту (фідера). Відтак,

$$\frac{L_2}{L_1} = \sqrt{\frac{R_e}{Z_0}} - 1. \tag{2.14}$$

З огляду на те, що $L_1 + L_2 = L_\Sigma$, отримуємо

$$L_1 = L_\Sigma \sqrt{\frac{R_e}{Z_0}} - 1; \;\; L_2 = L_\Sigma - L_1. \tag{2.15}$$

Антени типу PIFA (Planar Inverted F-Antenna) завдяки компактності та задовільним електричним характеристикам широко застосовуються в мобільних пристроях. Така антена складається з металевого екрана, випромінювальної пластини, короткозамикальної смужки та збуджуючого елемента, підключеного через коаксіальну лінію.

Проєктування PIFA виконується поетапно: від попереднього розрахунку за еквівалентною схемою до електродинамічного моделювання, оптимізації та експериментальної перевірки. У першому наближенні антену можна

розглядати як чвертьхвильовий несиметричний вібратор або як паралельний коливальний контур, параметри якого (індуктивність, ємність, хвильовий опір, добротність) визначаються геометрією антени та властивостями діелектрика.

Еквівалентна схема дозволяє оцінити резонансну частоту, смугу пропускання та умови узгодження з фідером шляхом вибору положення точки збудження. Це спрощує початкове проєктування та забезпечує основу для подальшої оптимізації антени.

РОЗДІЛ 3
МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕНИ

3.1 Програмний продукт для проектування та моделювання антен

Програмний інструмент Antenna Magus [13], призначений для проектування та моделювання антен різних типів, є базою даних різних антен, з якої користувач може вибрати відповідну параметризовану модель і експортувати її в пакет CST STUDIO SUITE, де потім виконується її моделювання та оптимізація (рис. 3.1).

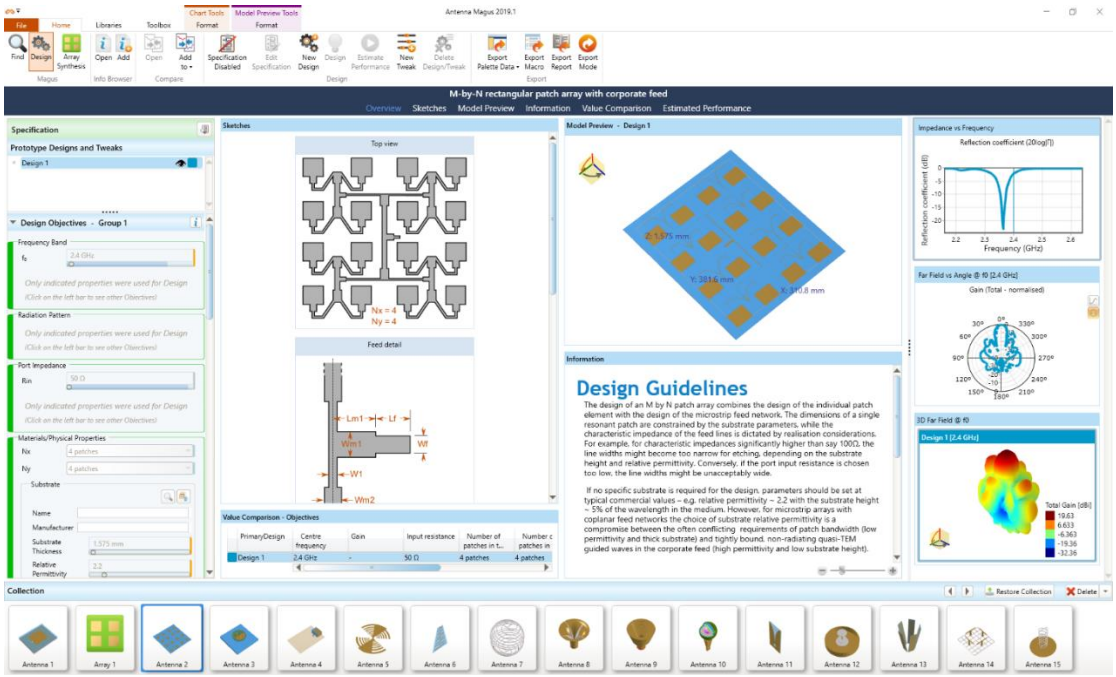


Рисунок 3.1 – Головне вікно Antenna Magus [13]

Пакет орієнтований на широкі маси розробників антен, фахівців з проблем EMC, а також системних інтеграторів, які оцінюють розташування антен на великих об’єктах.

В даний час клієнтам поставляється версія Antenna Magus 5.2.0 2025 року. У ній бібліотека моделей, до складу якої тепер входить 340 елементів, поповнилася новими типами антен: широкосмуговим мікрополковим випромінювачем FEGCOMA і компактним виконанням спіральної антени NMHA. Додано новий режим роботи No Specification без обов’язкового

визначення специфікації для пошуку випромінювача. Реалізовано алгоритм Design Range Extrapolation, з допомогою якого Antenna Magus виконує екстраполяцію робочих значень моделей антен, розширюючи цим область допустимих характеристик. З'явилася можливість експорту даних у форматі джерела ближнього поля для CST STUDIO SUITE та можливість орієнтації системи координат у базисі Людвіг-3. Реалізовано додаткові інструменти конфігурування антенних ґрат: операції трансформації, конформні перетворення, можливість дискретизації параметрів АФ-розподілу (рис. 3.2) тощо.

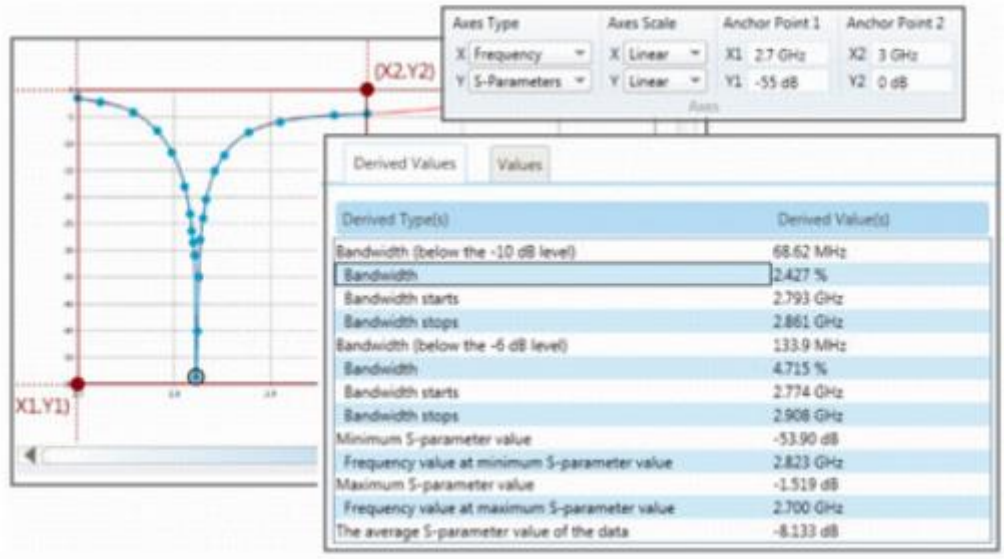


Рисунок 3.2 – Приклад виконання амплітудно-фазового розподілу [13]

У версію продукту Antenna Magus, що раніше вийшла, були внесені такі моделі антен: рупорні ТЕМ-антени з еліптичною формою розкриття апертури, які забезпечують КСХ Н<2 у надширокому діапазоні частот (20:1); гофровані рупорні антени з конічною нелінійною формою розкриття; нові моделі багатощілинних, інверсних спіральних антен тощо. В Antenna Magus було реалізовано широкий спектр покращень, додано низку нових функцій, а також розширено базу антен. Насамперед слід зазначити, що ця версія призначена лише для роботи на 64-розрядних платформах. Наслідком переходу продукту під дах німецької фірми CST стала уніфікація системи ліцензування з пакетом CST STUDIO SUITE, де Antenna Magus використовується як один з

опціональних обчислювальних модулів. До бази даних антен додано 13 нових типів антен, більшість із яких було реалізовано за специфічними запитами користувачів. Зокрема, додано 4 види рупорних антен, один з яких TEM-рупор з магнітним диполем, відомих під назвою кошелевий рупор, що дозволяє зберегти характеристики спрямованості в області верхніх частот. 5 планарних антен загального застосування реалізовано згідно з рекомендаціями Antenna Development Kit (ADK) компанії Texas Instruments.

Ряд змін торкнувся інструментарію проектування антенних решіток Array Tools. Найпомітнішим є нова можливість завдання відстані між елементами в абсолютних величинах (метрах чи дюймах), тоді як раніше воно вказувалося лише у довжинах хвилі.

Раніше у продукті реалізовано технологію інтелектуального проектування Smart Design, основна концепція якої полягає у реалізації одноетапного проектування з використанням усієї доступної інформації. Покроковий робочий процес, застосовуваний у попередніх версіях Antenna Magus, зараз спрощено одного натискання клавіші миші.

Як і раніше, користувач може самостійно задати всі проектні вимоги, а технологія Smart Design автоматично встановлює відсутні або незавершені набори основних параметрів. Програма Antenna Magus аналізує доступні цілі проектування та виконує інтелектуальний вибір відсутніх початкових параметрів. Згодом користувач може вручну підлаштувати запропоновані програмою налаштування.

Для реалізації технології Smart Design всі цілі проектування в Antenna Magus організовані групи. Для кожної з цих груп користувачеві доступний свій калькулятор параметрів, який дозволяє різними способами реалізувати поставлене завдання, групуючи початкові цілі проектних вимог. Технологія Smart Design дає користувачеві можливість задати лише ті параметри, які йому відомі, і повністю довіритися Antenna Magus для отримання кінцевих результатів за один етап проектування.

Було додано інструмент аналізу результатів Chart Tracer Tool з можливістю простої постобробки. Після вибору цікавого результату та

формату осей X,Y виконується автоматичний розрахунок положень мінімумів, максимумів, величини робочої смуги та інших ключових характеристик.

В Antenna Magus реалізована нова стартова сторінка, що відкривається під час запуску продукту. На ній дано підсилання на документи підтримки та нещодавно використані проекти. Також тут представлені основні стартові точки різних процесів моделювання в Antenna Magus. З'явилася можливість експорту доступних в Antenna Magus зображенні та інформації в буфер обміну або зовнішній файл.

Як уже згадувалося вище, до бази даних додано ряд нових конструкцій антен, в результаті чого загальний обсяг бази досяг числа 300 антен. До бібліотеки антенних решіток додані панелі дипольних випромінювачів, багатосекторні патч-решітки, які часто використовуються для мобільних базових станцій, а також універсальні решітки MxN патч-випромінювачів із загальним фідером.

Доступні раніше моделі хвилеводних зчленувань доповнені високопотужним коаксіально-хвильоводні переходом Т-типу, що поєднує в собі високий ступінь захисту від іскрового розряду і забезпечує хорошу робочу смугу. У моделі відбивачів додано 3 нових типи пристроїв, серед яких хотілося б відзначити параболічне дзеркало з подвійним дипольним пластинчастим джерелом. Такий тип фідера використовує зворотне осьове випромінювання для збудження дзеркала, що перешкоджає виникненню затінення розкриття.

Різні варіації простих дипольних випромінювачів становлять окремий клас дротяних антен. Бібліотека доповнена J-подібними антенами, а також конюшина-антенами з різним числом пелюсток.

У новій версії Antenna Magus додано групу друкованих антен: від широкосмугових LTSA до вкрай компактних монополів для діапазону WLAN. Особливу увагу слід звернути на нову модель двосмугової PIFA антени, яка широко застосовується в мобільних пристроях стандарту GSM 900/1800. Вона примітна можливістю обліку паразитних елементів, що утворюють додаткову смугу пропускання (при порівнянні з класичними антенами PIFA, раніше

доступними в Antenna Magus).

Додано ряд діелектричних антен хвилі, що витікає, а також багатомодовий конічний рупор зі спіральною діелектричною вставкою. Незважаючи на те, що для діелектричних стрижневих антен доступно безліч варіантів реалізації, в більшості випадків вони являють собою стрижень, що звужується, круглого або прямокутного перерізу. При цьому фідерний хвилевод збуджує частину вхідної потужності у вигляді поверхневої хвилі, що розповсюджується вздовж стрижня з мінімальним відображенням. Отримана хвиля починає безперервно випромінювати, поступово перетворюючись із обмеженої у хвилю у вільному просторі.

Також до Antenna Magus додано ряд практичних моделей широкосмугових планарних спіральних антен з додатковим шаром, що поглинає. Шари поглинаючого матеріалу використовуються для отримання односпрямованого випромінювання за збереження багато октавного робочого діапазону спіральних випромінювачів.

Бібліотека антен програмного забезпечення Antenna Magus пропонує 11 типів мікросмужкових антен. Деякі антени відрізняються від інших конструктивним розташуванням елементів випромінювача. Перевага надається антенам із земляною металізацією на одній стороні склотекстоліту. Це дає найбільший коефіцієнт підсилення та простоту виготовлення. Ні ж розглянуті антени, що працюють у смузі частот 2300-2400 МГц. Щоб визначити найкращу ефективність антени встановимо незмінним матеріал підлохки та опір входу 50 Ом. Це склотекстоліт FR4 завтовшки 1.5 мм. Діелектрична проникність FR4 дорівнює 4,5, тангенс діелектричних втрат 0,017. Критерії, за якими буде обрана антена, що розробляється - це найменше значення КСХ і найбільше значення коефіцієнта підсилення в смузі частот 2300-2400 МГц. за однакових розмірів.

На рисунку 3.3 показано модель антени «Circular pin-fed linearly polarized patch antenna».

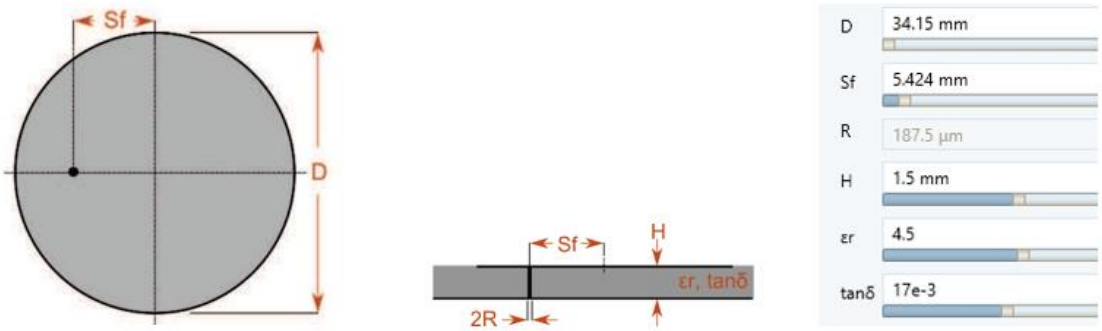


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд і розміри антени «Circular pin-fed linearly polarized patch antenna»

На рисунках 3.4-3.6 показані основні характеристики антени з випромінювачем круглої форми КСХ, діаграма спрямованості та коефіцієнт підсилення відповідно.

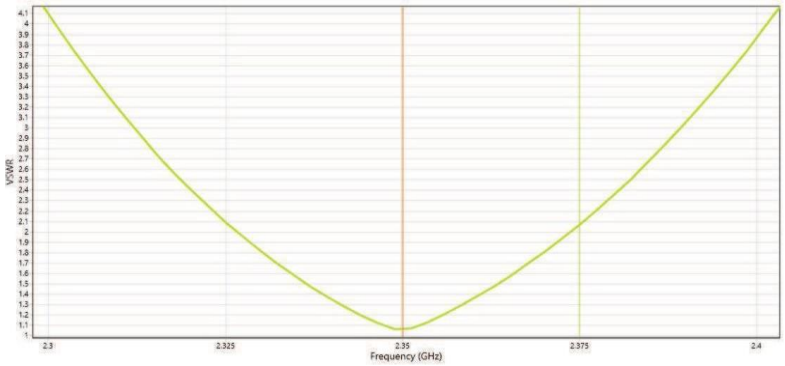


Рисунок 3.4 – КСХ антени «Circular pin-fed linearly polarized patch antenna»

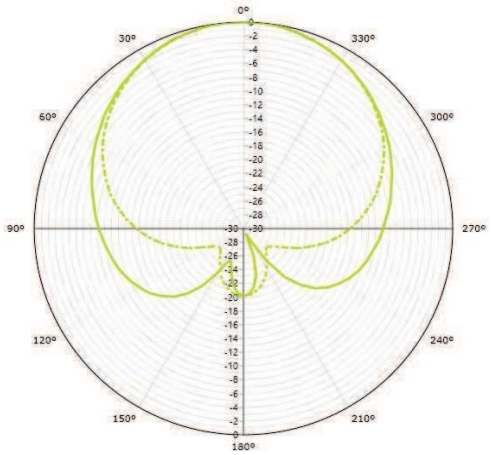


Рисунок 3.5 – Діаграма спрямованості антени «Circular pin-fed linearly polarized patch antenna»

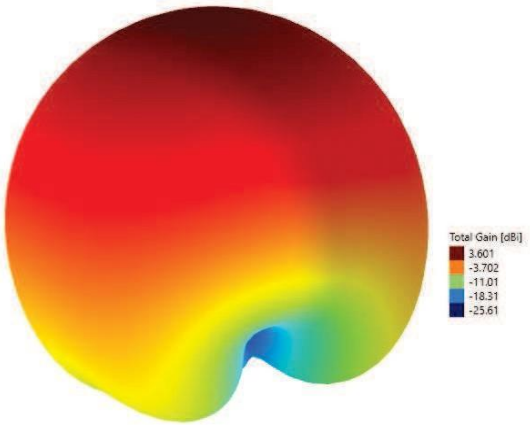


Рисунок 3.6 – Коефіцієнт підсилення антени «Circular pin-fed linearly polarized patch antenna»

Отже антена «Circular pin-fed linearly polarized patch antenna» має наступні особливості:

– антена невеликих геометричних розмірів, приблизно 50х50 мм;

– значення КСХ в робочої смузі частот більше 4, що складає втрату потужності на 36%;

– діаграма спрямованості рівномірна, кут розкриття антени 60°;

– маленький коефіцієнт підсилення: 3.6 дБ.

На рисунку 2.5 показано модель антени «Printed Microstrip-fed Yagi-Uda Dipole Array».

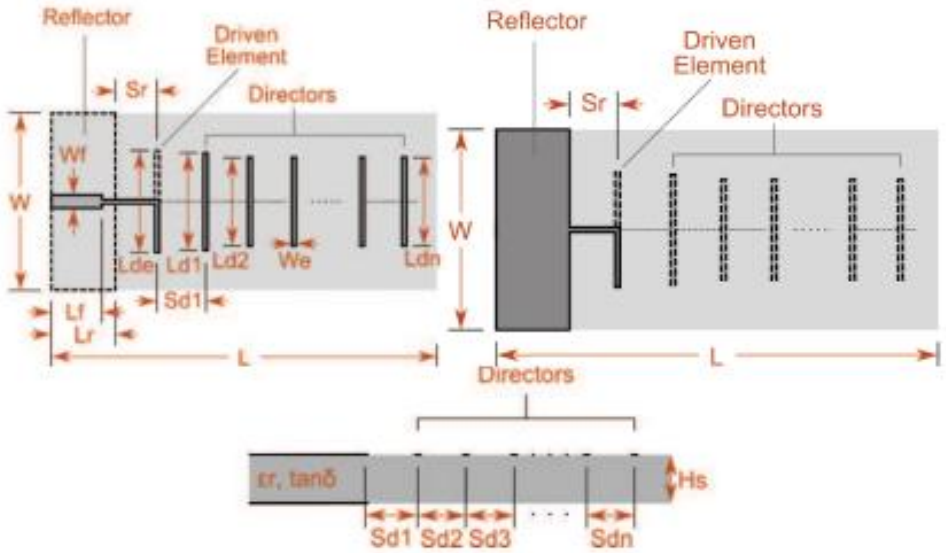


Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд антени «Printed Microstrip-fed Yagi-Uda Dipole Array» [13]

Геометричні розміри випромінювача антени «Printed Microstrip-fed Yagi-Uda Dipole Array» показано на рисунку 3.6.

На рисунках 3.9-3.11 показані основні характеристики антени з випромінювачем круглої форми КСХ, діаграма спрямованості та коефіцієнт підсилення відповідно.

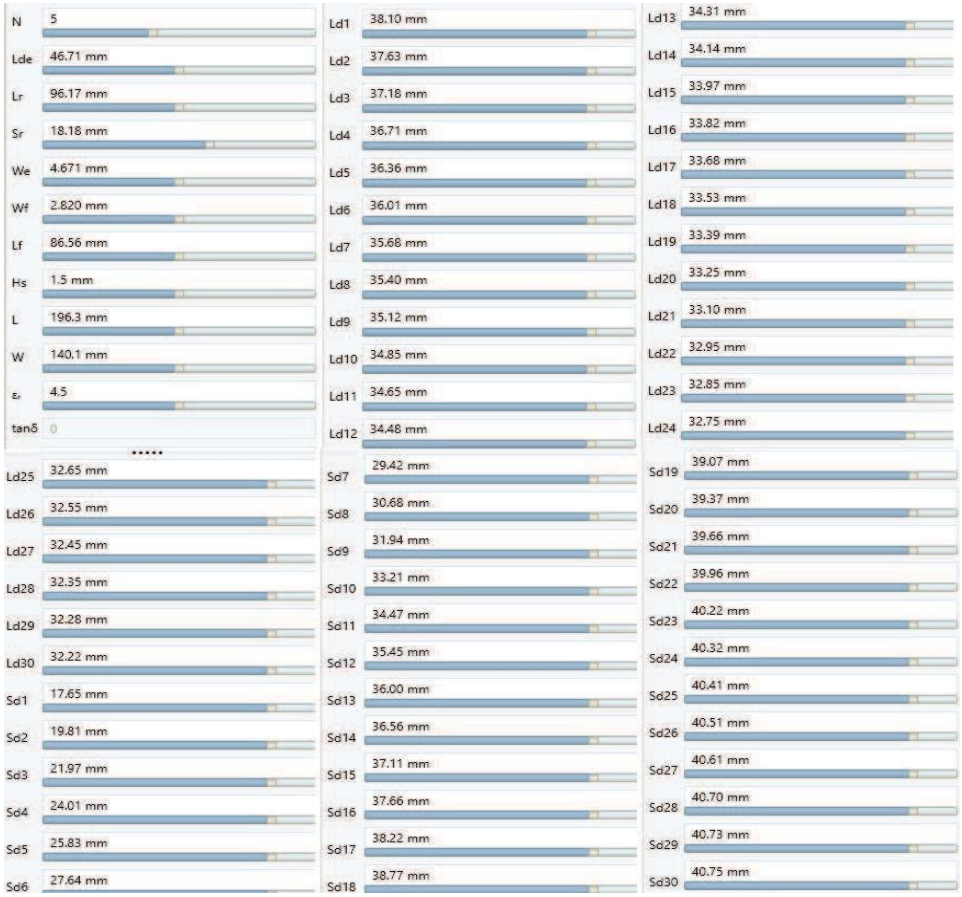


Рисунок 3.8 – Розміри антени «Printed Microstrip-fed Yagi-Uda Dipole Array»

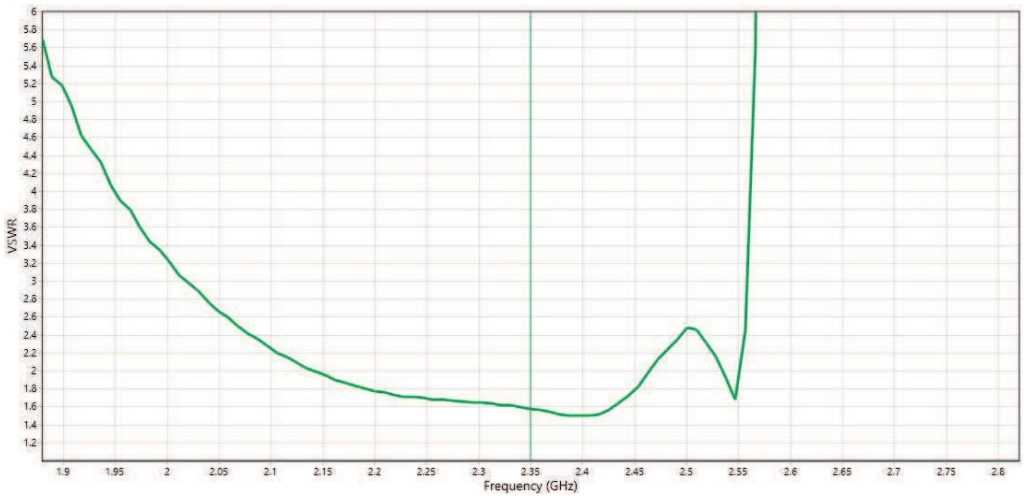


Рисунок 3.9 – КСХ антени «Printed Microstrip-fed Yagi-Uda Dipole Array»

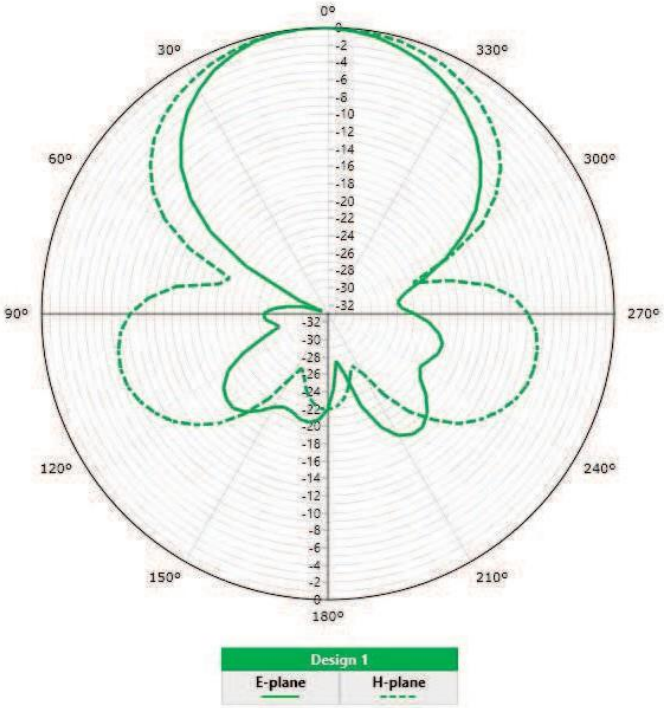


Рисунок 3.10 – Діаграма спрямованості антени «Printed Microstrip-fed Yagi-Uda Dipole Array»

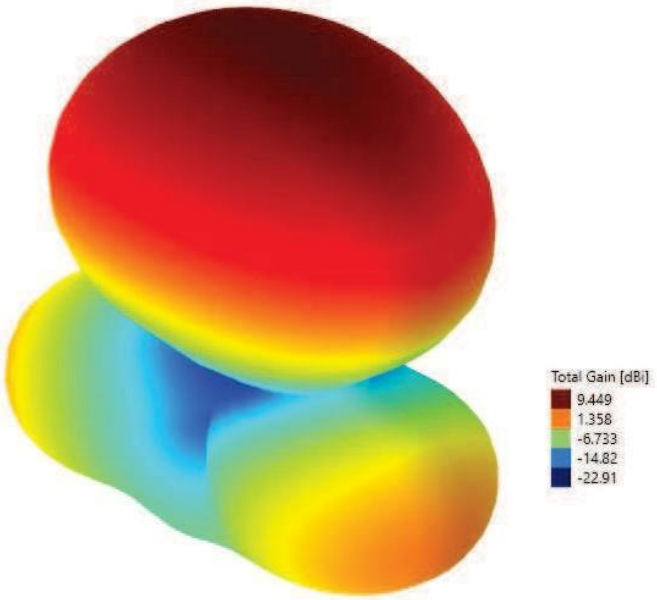


Рисунок 3.11 – Коефіцієнт підсилення антени «Printed Microstrip-fed Yagi-Uda Dipole Array»

Висновки по антені «Printed Microstrip-fed Yagi-Uda Dipole Array»:

– антена дуже великих геометричних розмірів, приблизно 50х1380мм;

– значення КСХ в робочої смузі частот не більше 1.8, що складає втрату

потужності на 8%;

–діаграма спрямованості рівномірна, кут розкриття антени 60° коефіцієнт підсилення: 9.45 дБ

На рисуноку 2.10 показана модель та геометричні розміри антени «Planar log-periodic dipole array».

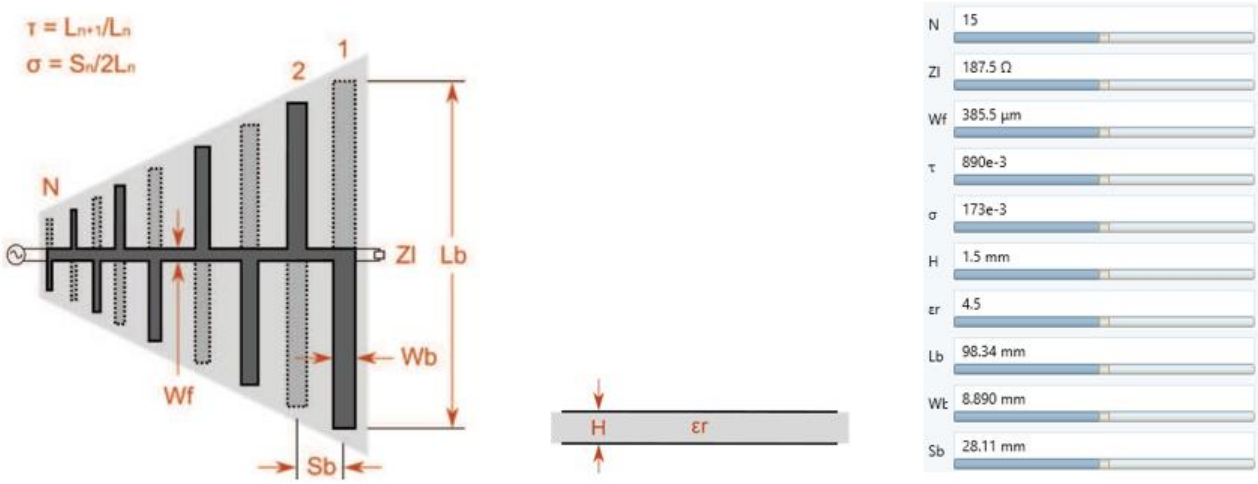


Рисунок 3.12 – Зовнішній вигляд і розміри антени «Planar log-periodic dipole array» [13]

На рисунках 3.11-3.13 показані основні характеристики антени з випромінювачем круглої форми КСХ, діаграма спрямованості та коефіцієнт підсилення відповідно.

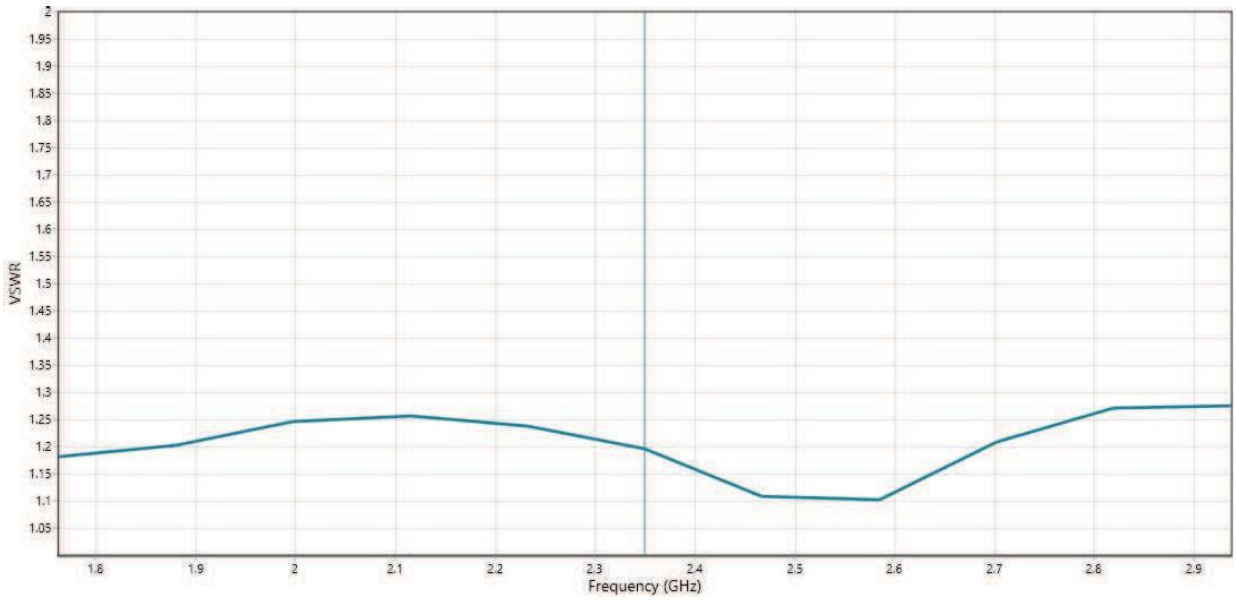


Рисунок 3.13 – КСХ антена «Planar log-periodic dipole array»

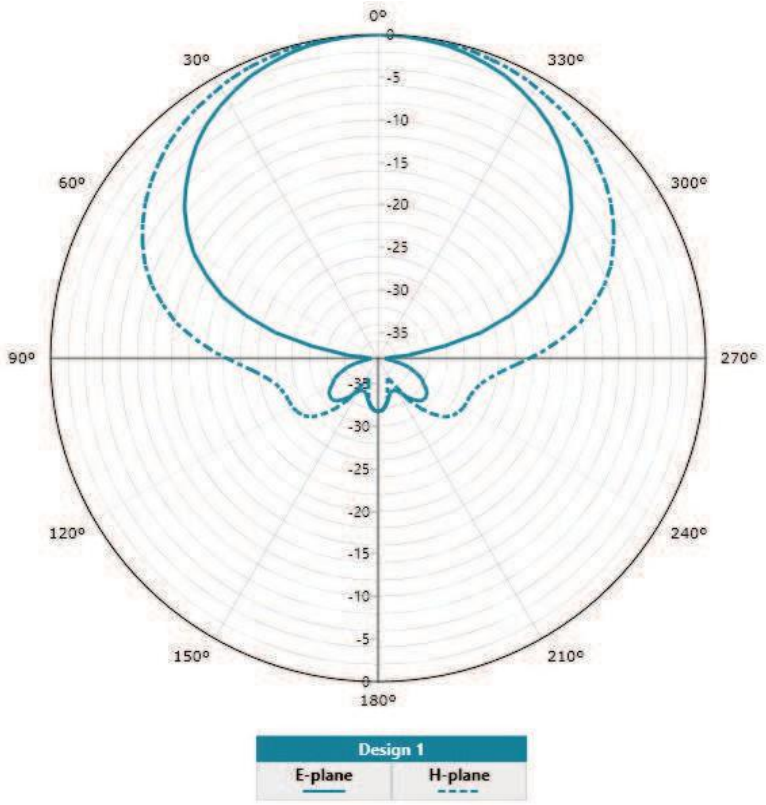


Рисунок 3.14 – Діаграма спрямованості антени «Planar log-periodic dipole array»

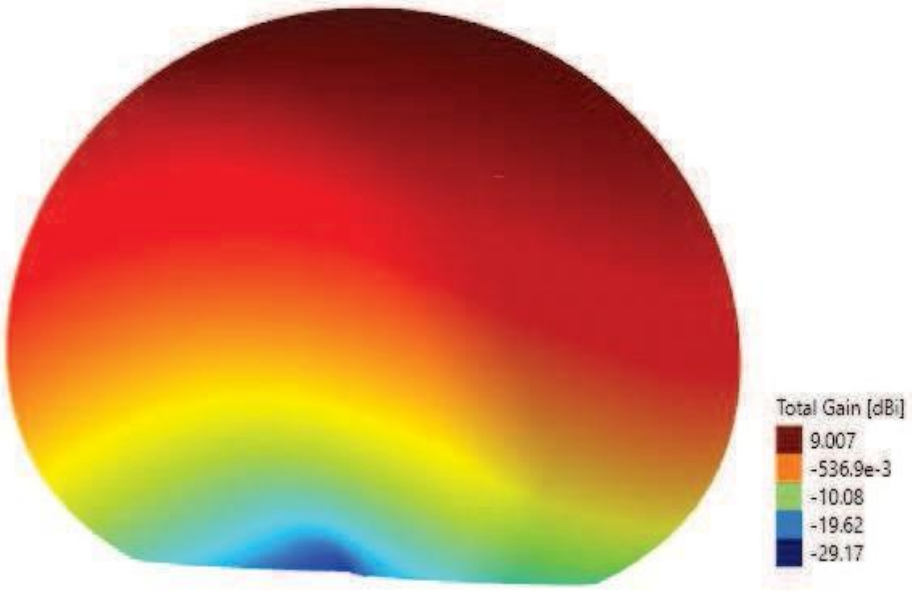


Рисунок 3.15 – Коефіцієнт підсилення антени «Planar log-periodic dipole array»

Отже антена «Planar log-periodic dipole array» характеризується:

– дуже великими геометричними розмірами, приблизно 100х540мм;

– значення КСХ у робочій смузі частот не більше 1.25, що становить

втрату потужності на 1,7%, проте за рисунком 3.15 видно, що антена широкосмугова, і її робоча смуга значно ширша за 100 МГц;

– діаграма спрямованості рівномірна, кут розкриття антени 40°;

– коефіцієнт підсилення – 9 дБ.

На рисунку 3.16 показано модель антени «M-by-N rectangular patch array with corporate feed».

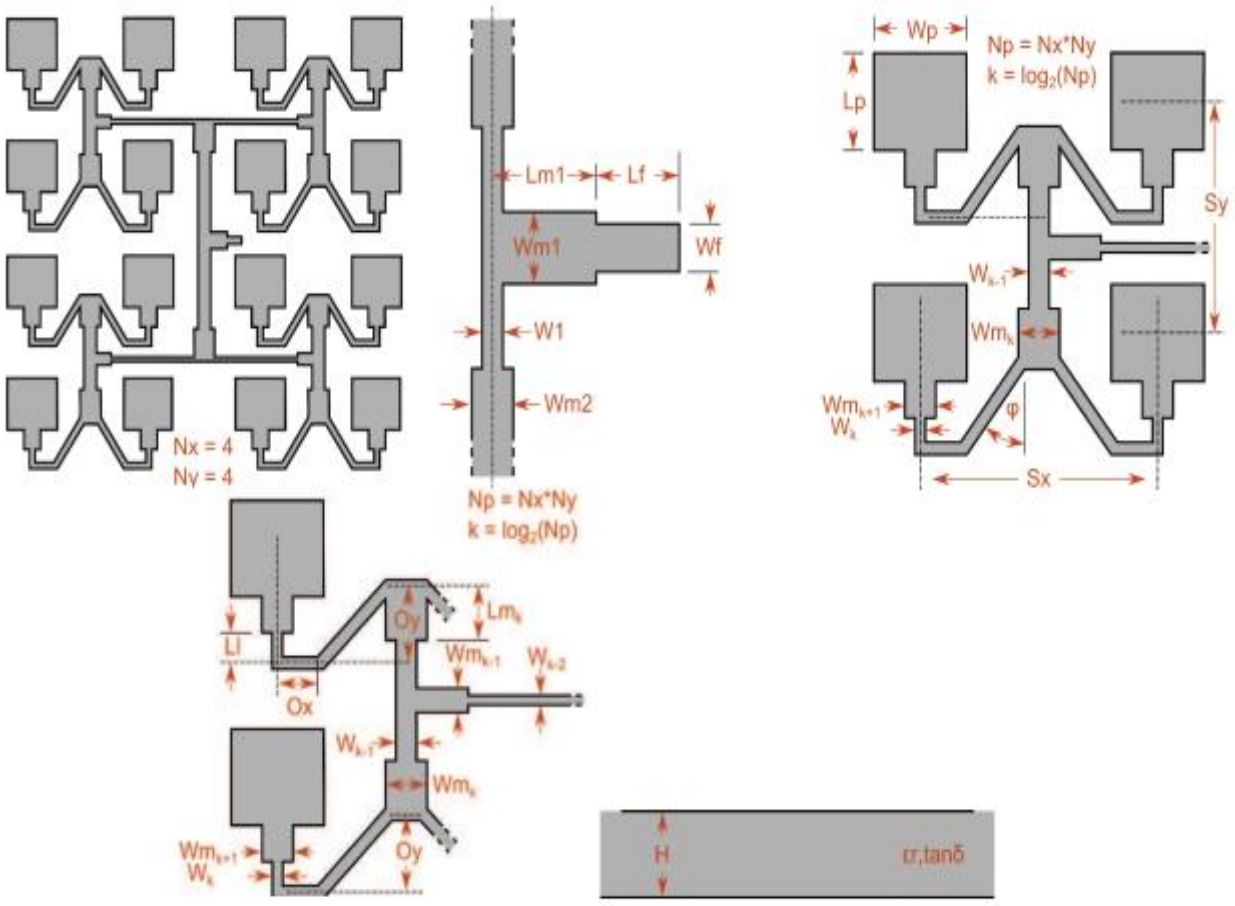


Рисунок 3.16 – Зовнішній вигляд антени «M-by-N rectangular patch array with corporate feed» [13]

Геометричні розміри випромінювача антени «Printed Microstrip-fed Yagi-Uda Dipole Array» показано на рисунку 3.17.

Рисунок 3.17 – Розміри антени «M-by-N rectangular patch array with corporate feed»

На рисунках 3.18-3.20 показані основні характеристики антени з випромінювачем круглої форми КСХ, діаграма спрямованості та коефіцієнт підсилення відповідно.

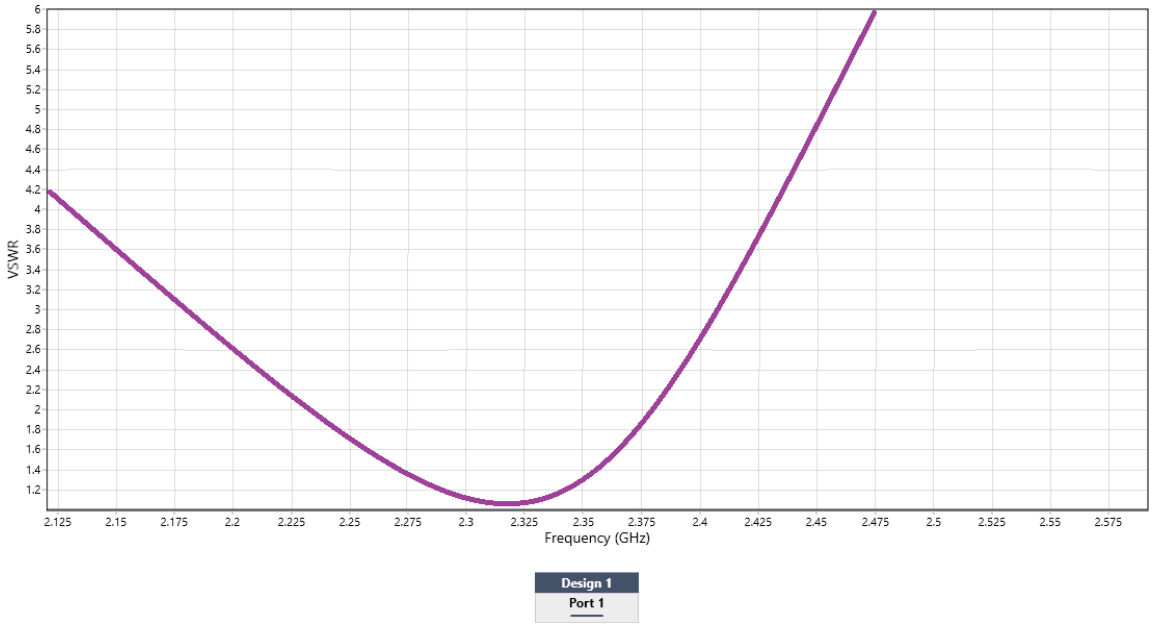


Рисунок 3.18 – КСХ антена «M-by-N rectangular patch array with corporate feed»

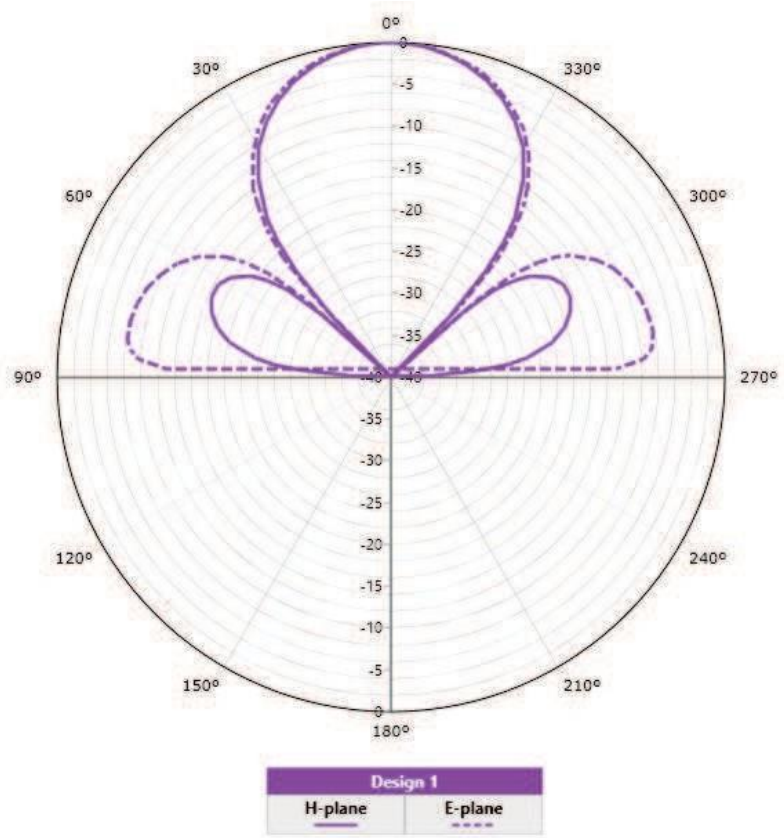


Рисунок 3.19 – Діаграма спрямованості антени «M-by-N rectangular patch array with corporate feed»

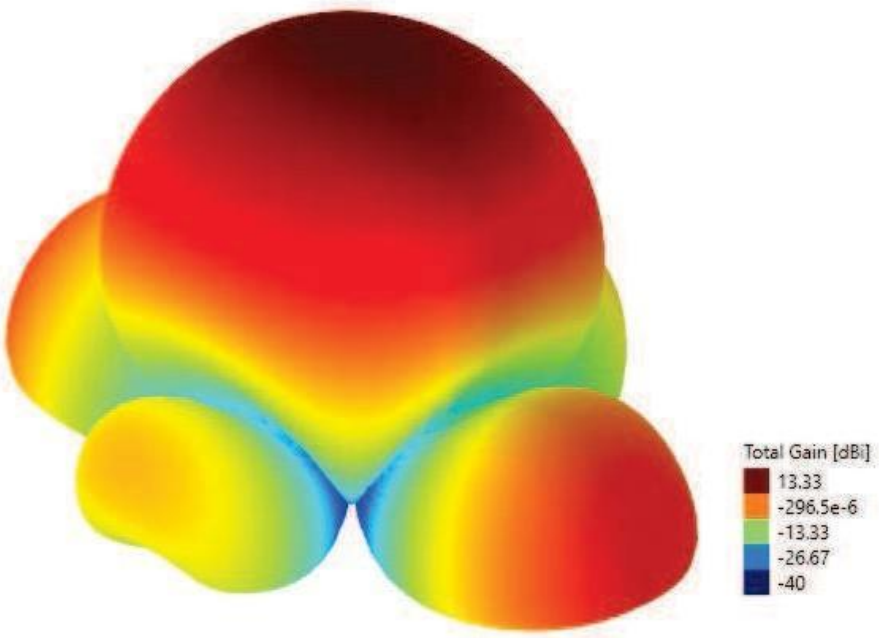


Рисунок 3.20 – Коефіцієнт підсилення антени «M-by-N rectangular patch array with corporate feed»

Висновки по антені «M-by-N rectangular patch array with corporate feed»:

– антена дуже великих геометричних розмірів, приблизно 50х1380мм;

– значення КСХ в робочої смузі частот не більше 2.8, що складає втрату потужності на 22.4%;

– діаграма спрямованості рівномірна, кут розкриття антени 60°

– коефіцієнт підсилення: 13.33 дБ

3.2 Опис антени

В якості антена діапазону 2300-2400 МГц вибрано антену «M-by-N rectangular patch array with corporate feed» з покращеним коефіцієнтом підсилення, представлена на рисунку 3.21. Компоненти електричного поля на двох краях по ширині знаходяться в протилежних напрямках і, оскільки елемент має довжину, велику λ/2, врівноважують один одного в поперечному напрямку. Тангенціальні компоненти, що знаходяться у фазі, показують, що отримані поля об’єднуються, щоб дати максимальне поле випромінювання нормалі до поверхні конструкції.

З точки живлення електромагнітна енергія поширюється у двох напрямках по мікросмужкових лініях, що зв’язують випромінювачі. У точці живлення кожного випромінювача частина енергії відгалужується у випромінювач та випромінюється у простір. Відбита електромагнітна хвиля від точки живлення кожного випромінювача в мікросмужкову лінію зв’язку компенсується узгоджуючими напівхвильовими шлейфами, що забезпечує синфазну запитку всіх випромінюючих елементів з малим коефіцієнтом стоячої хвилі в точці живлення, тобто формування променя по нормалі до площини антени. Діаграма спрямованості формується завдяки синфазній запитці випромінювачів з незначним спаданням електромагнітної енергії від центральних випромінювачів до крайніх, що забезпечує зменшення рівня бічних пелюсток. Кількість випромінювачів визначається вимогами до ширини діаграми спрямованості та коефіцієнта підсилення мікросмужкової антени.

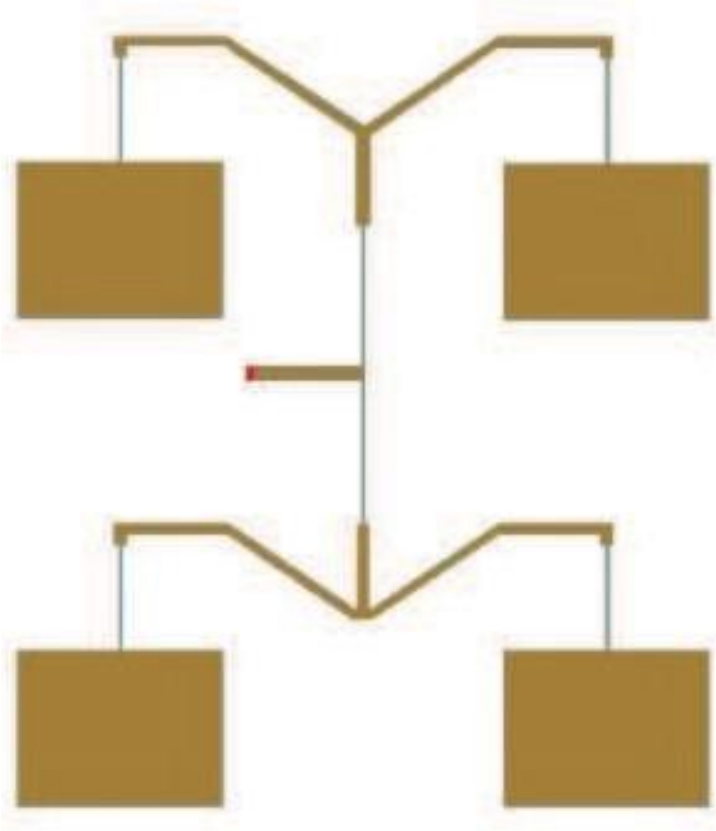


Рисунок 3.21 – Випромінювач досліджуваної антени

Мікросмужкова антена має площину заземлення з одного боку діелектричної підкладки, з іншого боку – випромінюючі елементи. Елемент, як правило, виготовлений із провідного матеріалу, такого як мідь або золото, і може приймати будь-яку можливу форму. Діелектрична постійна підкладки (ε_r) знаходиться в діапазоні $2{,}2 < \varepsilon_r < 12$. Для спрощення аналізу та прогнозування продуктивності випромінюючий елемент зазвичай встановлюється квадратний, прямокутної, круглий, трикутної, еліптичної чи іншої поширеної форми. Для створення антени з більшою пропускний здатністю, високою ефективністю і максимальним коефіцієнтом підсилення, вона повинна бути виконана з підкладки, матеріал якої має найменшу діелектричну постійну та оптимальну товщину. Для підвищення коефіцієнта підсилення використовується масив випромінюючих елементів. Основні параметри антени представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні параметри антени

Кількість	Типове	Мінімум	Максимум
Поляризація	Лінійна	–	–
Діаграма спрямованості	Однонаправлена	–	–
Підсилення	11 дБ	8 дБ	20дБ
Опір	50 Ом	50 Ом	150 Ом

Антена формується шляхом розміщення прямокутних патч-елементів на одній лінії як в *X*-, так і в *Y*-осях. На осі *X* є *M* патчів і *N* по осі *Y. M і N* – обидва числа результат зведення в ступінь цифри 2.

Поодинокі елементи масиву мікросмужкової антени живляться за допомогою мікросмужкової лінії, підключеної до краю елемента. Чотири елементи з одним типом поляризації цієї антени живляться від однієї точки подачі напруги . Згин мікросмужкових ліній під кутом 90º, а також Т-подібні перехрестя, зменшують неузгодженість через відображення від розривів. Імпеданс можливо регулювати з допомогою ширини мікросмужкових ліній передачі.

Конструкція 2 по 2 поєднує в собі конструкцію окремого елемента з живленням по мікросмужковій лінії. Розміри одного резонансного елемента обмежені параметрами підкладки , у той час як хвильовий опір ліній передачі диктується міркуваннями конструктивного виконання. Наприклад, для характеристичних імпедансів значно вище, чим, скажемо , 100 Ом, ширина ліній може стати занадто вузька для травлення, в залежно від висоти підкладки та відносної діелектричної проникності. І навпаки, якщо опір вхідного порту буде обраний занадто низький, то ширина лінії може бути неприйнятно великою. Довжина елемента може бути змінена, щоб змістити резонанси або центральні частоти окремих елементів. Резонансний опір входу одного елемента може бути зменшено за рахунок збільшення ширини елемента. Це прийнятно до тих пір, поки відношення ширини до довжини не перевищує 2. Для підвищення пропускної спроможності необхідно збільшити

висоту підкладки і / або зменшити діелектричну проникність підкладки (це також буде впливати на резонансну частоту та узгодження імпедансу).

3.3 Оптимізація параметрів антени

Після створення моделі антени та первинного аналізу характеристик, модель потребує налаштування за допомогою варіювання геометричних розмірів мікросмужкової лінії. Геометричні розміри патчів задають центральну частоту антени. Чим більші розміри патчу, тим нижча робоча частота антени. Розмір ліній узгодження впливає значення КСХ частоти, на яку налаштований патч антени. Не змінюючи значення відносини сторін патча, зменшуємо його розміри, після цього знову виробляємо моделювання антени, тим самим експериментально налаштовуємо робочий діапазон антени на центральну частоту 2,35 ГГц. На рисунках 3.22 і 3.23 показані геометричні розміри випромінювача та КСХ антени відповідно після зміни розмірів патчів.

Рисунок 3.22 – Розміри антени «M-by-N rectangular patch array with corporate feed» після зміни розмірів патчів

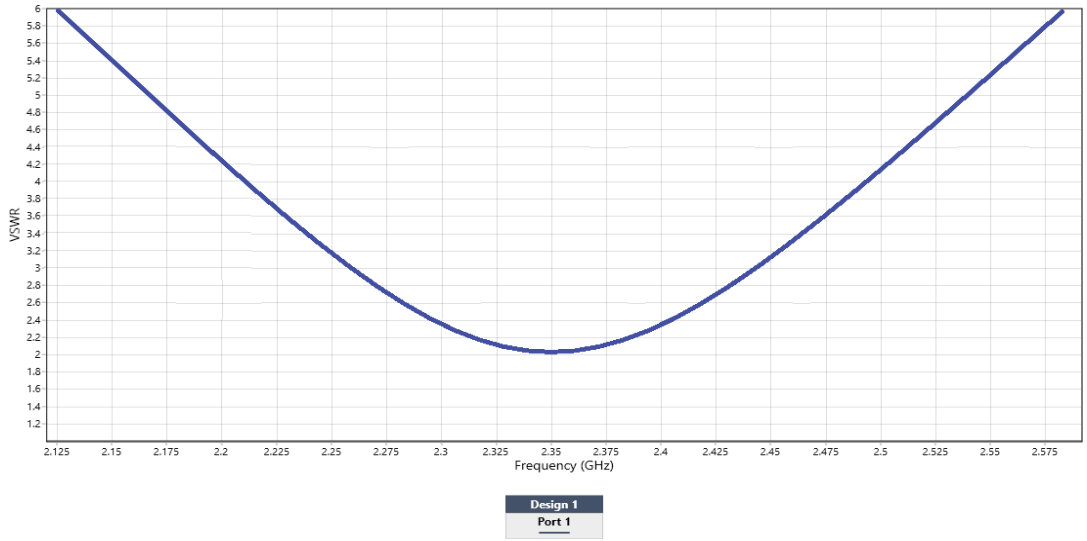


Рисунок 3.23 – КСХ антени «M-by-N rectangular patch array with corporate feed» після зміни розмірів патчів

Видно, що центральна частота відповідає заданій, проте найменше значення КСХ у робочій смузі частот збільшилося. Відповідно, необхідно змінити геометричні розміри ліній узгодження. Розміри патчів випромінювача зменшено на 0,23%. Зменшуємо значення геометричних розмірів ліній узгодження також на 0,23%. Після цього знову робимо моделювання антени. На рисунках 3.24 та 3.25 показані геометричні розміри випромінювача та КСХ антени відповідно після зміни геометричних розмірів ліній узгодження.

Рисунок 3.24 – Розміри антени «M-by-N rectangular patch array with corporate feed» після зміни розмірів ліній узгодження

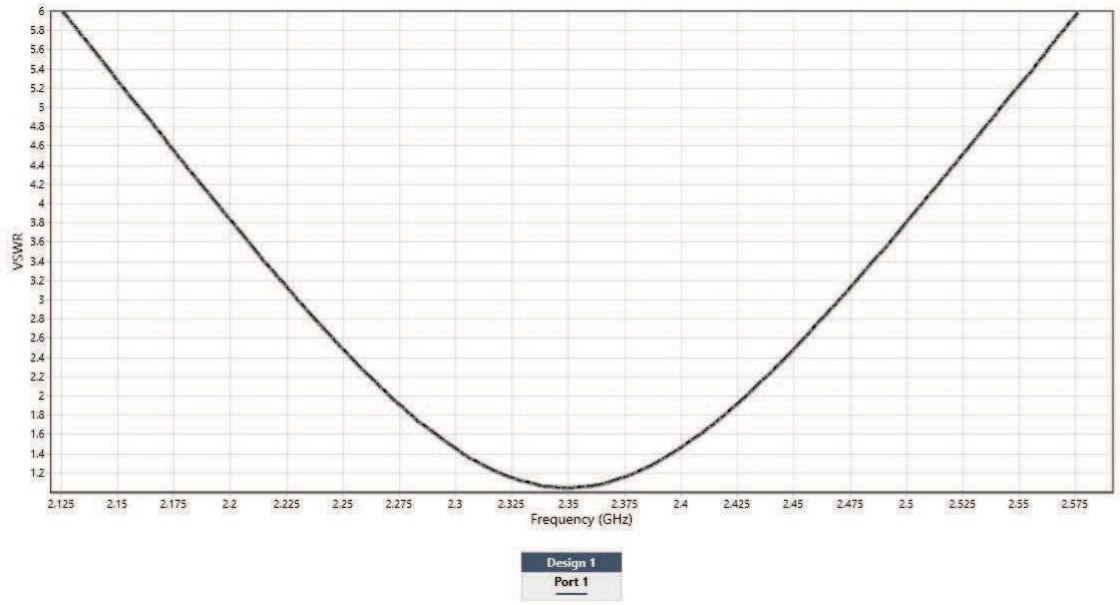


Рисунок 3.25 – КСХ антени «M-by-N rectangular patch array with corporate feed» після зміни розмірів ліній узгодження

По рисунку 3.25 можна сказати, що моделювання проведено успішно, значення КСХ у робочій смузі частот не більше 1.5, що відповідає втраті потужності на 4%. На рисунках 3.26 і 3.27 показані діаграма спрямованості та коефіцієнт підсилення оптимізованої антени.

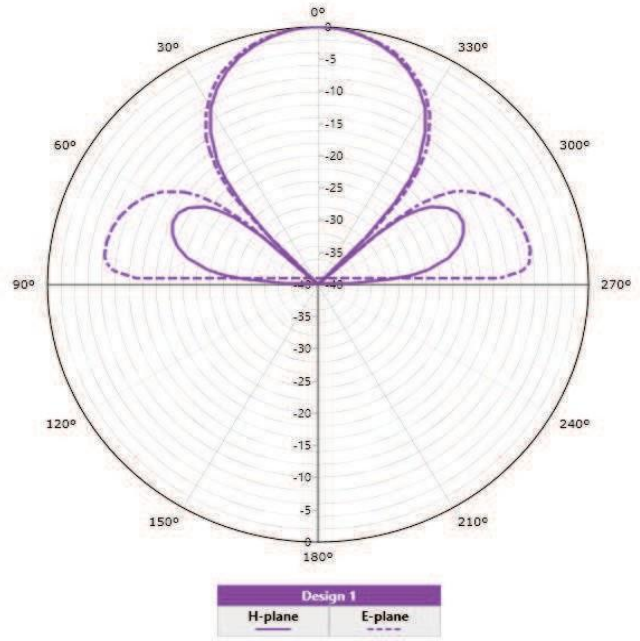


Рисунок 3.26 – Діаграма спрямованості антени M-by-N rectangular patch array with corporate feed оптимізованої антени

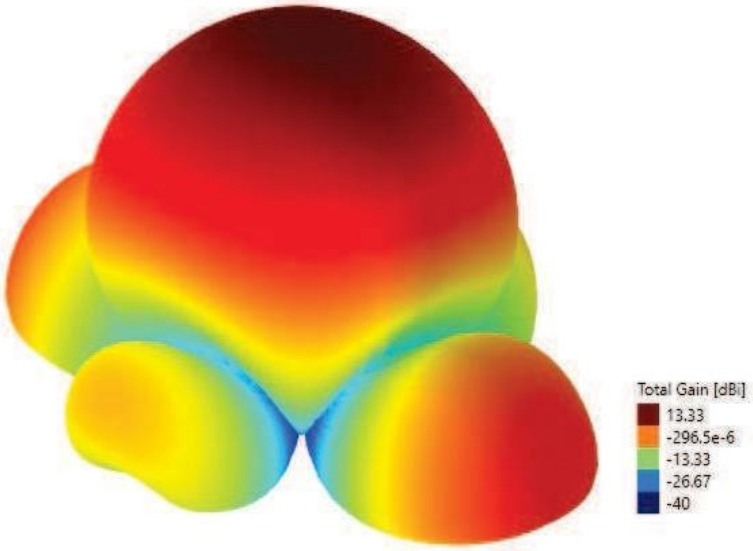


Рисунок 3.27 – Коефіцієнт підсилення антени «M-by-N rectangular patch array with corporate feed» оптимізованої антени

РОЗДІЛ 4
ВИГОТОВЛЕННЯ АНТЕННИ 2300-2400 МГц

4.1 Програмне забезпечення для проектування друкованої плати антени

Виходячи з можливостей отримання точних і довірених результатів було прийнято рішення проектувати макет антени за допомогою програмного пакета Sprint Layout.

«Програмний пакет Sprint-Layout є простим, але в той же час дуже ефективним інструментом для проектування і ручної розводки друкованих плат малої і середньої складності. Основною перевагою Sprint-Layout є інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що включає в себе лише найнеобхідніші інструменти для підготовки друкованих плат розміром 300 на 300 мм. програма дозволяє працювати з двома шарами (провідників і маркування) для кожної сторони плати. Додаткові можливості – шар паяльної маски, металізація, SMD-маска. Вбудований трасіровщик тільки допомагає розводити провідники, і не є автоматичним» [14].

«Бібліотека містяться найбільш поширені електронні компоненти. В Sprint-Layout реалізована можливість експортувати результати роботи в популярні формати Excellon і Gerber, а також створити файл HPGL для обробки друкованої плати на програмно-керованому фрезерному верстаті. Пакет широко застосовується для виготовлення плат ЛУТ (лазерно-прасувальну технологія) способом» [14].

Для розробки конструкції обираємо одношарову двосторонню друковану плату, виготовлену зі склотекстоліту, фольгованого з обох боків. Такий тип плати забезпечує високу механічну міцність паяних з’єднань і дозволяє досягти значної щільності монтажу елементів.

З огляду на те, що антенний модуль мобільного телефону належить до побутових пристроїв, доцільно використовувати недорогий матеріал. У зв’язку з цим як основу обираємо FR-4 – фольгований склотекстоліт для

двосторонніх друкованих плат із невисокою щільністю монтажу.

Оскільки застосовується двостороння друкована плата, оптимальним є її виготовлення комбінованим позитивним методом. Цей спосіб відзначається простотою реалізації та не потребує значних фінансових витрат.

4.2 Розробка друкованої плати

У сучасних телекомунікаційних системах друковані плати антен відіграють ключову роль, оскільки саме вони забезпечують випромінювання, приймання та узгодження електромагнітних сигналів. На відміну від звичайних друкованих плат, плати антен працюють у високочастотному діапазоні, що висуває підвищені вимоги до точності геометрії, матеріалів та стабільності технологічного процесу їх виготовлення.

Технологічний процес виготовлення друкованої плати антени починається з етапу проєктування. Окрім створення електричної схеми, на цьому етапі проводиться моделювання антени з урахуванням робочої частоти, ширини смуги пропускання, коефіцієнта стоячої хвилі, діаграми спрямованості та поляризації. Для телекомунікаційних застосувань, таких як мобільний зв’язок, Wi-Fi, супутникові та радіорелейні системи, особливо важливо забезпечити узгодження антени з передавально-приймальним трактом і мінімізувати втрати сигналу. Результатом проєктування є набір виробничих файлів, у яких геометричні розміри провідних елементів визначаються з точністю до часток міліметра.

Основою для виготовлення друкованої плати антени є діелектричний матеріал з контрольованими електричними параметрами. У телекомунікаціях, особливо на високих частотах, важливими є діелектрична проникність, тангенс кута діелектричних втрат і стабільність цих параметрів у широкому діапазоні температур. Найчастіше використовуються матеріали типу FR-4 для нижчих частот або спеціалізовані високочастотні діелектрики для мікрохвильових застосувань. Після вибору матеріалу формується провідний

рисунок антени на мідній фользі за допомогою фотолітографічного процесу та хімічного травлення.

На етапі формування провідного шару особливе значення має точність геометрії антенного елемента та живильної лінії. Навіть незначні відхилення ширини мікросмужкової лінії або зазорів між елементами можуть призвести до зміщення резонансної частоти та погіршення узгодження. Саме тому процеси нанесення фоторезисту, експонування та травлення контролюються з підвищеною точністю, що є критичним для стабільних характеристик.

Свердління та металізація отворів у платах антен застосовуються переважно для формування заземлювальних переходів, екранування або підключення антени до інших шарів плати. Якість металізації отворів безпосередньо впливає на рівень паразитних індуктивностей і втрат, що особливо відчутно в радіочастотних трактах. Тому ці операції виконуються з урахуванням вимог високочастотної електроніки.

Після формування провідників на плату наноситься паяльна маска, однак у випадку антен її застосування часто обмежується або виключається в зоні випромінювальних елементів. Це пов’язано з тим, що додатковий діелектричний шар може змінювати електромагнітні параметри антени. Фінішне покриття контактних майданчиків обирається таким чином, щоб забезпечити мінімальні втрати та стабільні паяльні властивості.

Завершальним етапом виробництва друкованої плати антени є контроль якості, який у телекомунікаціях включає не лише візуальну та електричну перевірку, а й вимірювання радіочастотних параметрів. Аналіз коефіцієнта відбиття, узгодження та ефективності антени дозволяє оцінити відповідність виготовленої плати заданим характеристикам. Саме на цьому етапі підтверджується придатність антени до використання в телекомунікаційних системах.

Отже, технологічний процес виробництва друкованої плати антени є поєднанням класичних методів виготовлення друкованих плат і специфічних вимог високочастотної техніки. Висока точність, правильний вибір матеріалів

і суворий контроль на кожному етапі є запорукою ефективної роботи антен у сучасних телекомунікаційних системах.

Конструкція антени не є планарною і через складну конструкцію її буде не просто проектувати використовуючи програму Sprint-Layout . Якщо розкласти PIFA антену по одній площині, антена набуває планарну конструкцію, це набагато спрощує процедуру проектування.

Антена нанесена на носій з FR-4 з розміром 175 × 85 мм. FR-4 – вогнетривкий (Fire Retardent) імпортний фольгований склотекстоліт. FR-4 на сьогодні найпоширеніша марка матеріалу для виробництва друкованих плат.

4.3 Виготовлення антени фоторезистивним методом

Під час виготовлення друкованих плат, особливо складної конфігурації, найбільш доцільним є застосування фоторезистивного методу. Його головною перевагою є отримання чіткого та висококонтрастного рисунка провідників. Фоторезист – це світлочуткий матеріал у вигляді лаку або плівки, який під дією світла змінює свої фізико-хімічні властивості.

Процес використання фоторезиста полягає в тому, що на поверхню плати з нанесеним шаром фоторезисту накладають фотошаблон і виконують експонування. Після цього за допомогою спеціального розчинника, зазвичай на основі NaOH, видаляються засвічені ділянки (у разі позитивного фоторезиста) або незасвічені (у разі негативного).

Усі фоторезисти поділяються на позитивні та негативні. Для позитивного фоторезиста елементам провідного рисунка на платі відповідають темні ділянки фотошаблону, тоді як для негативного – прозорі.

Таким чином, в середовищі Sprint Layout було спроектовано струмопровідний рисунок, який в подальшому буде використаний як шаблон при засвіченні (рис. 4.1).

Цей шаблон повинен бути роздрукований певним чином, з урахуванням наявного фоторезиста, щоб потрібний малюнок не засвічувати ультрафіолетовою лампою.

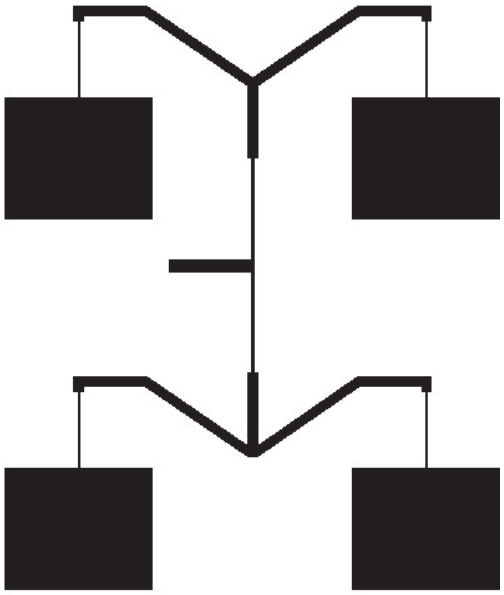


Рисунок 4.1 – Шаблон антени, що виготовляється

Після нанесення позитивного фоторезиста поверх укладається шаблон та засвічується ультрафіалетовою лампою протягом 15 хвилин. Потім малюнок, що вийшов, проявляється в розчині NaOH і лягає в розчин хлорного заліза. В результаті отримуємо готову плату, в якій необхідно зробити отвір для установки НВЧ розєму. У якості роз'єм обраний SMA. На рисунках 4.2 і 4.3 представлений зовнішній вигляд плати виготовленої антени. Видно, що випромінювач антени вийшов із чіткими межами та з добре протруєними ділянками міді.

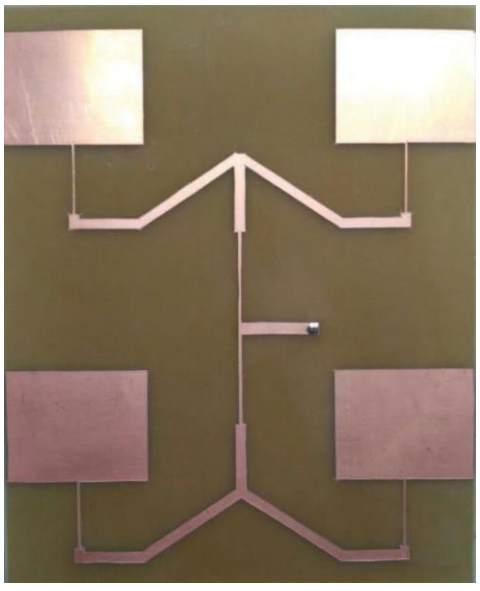


Рисунок 4.2 – Випромінювач виготовленої антени

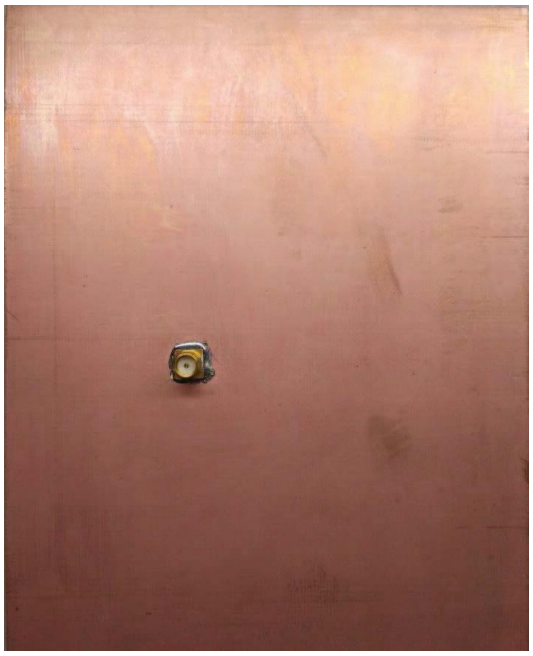


Рисунок 4.3 – Земля виготовленої антени

У результаті правильно виконаних етапів експонування, проявлення та травлення отримується якісна друкована плата з чітко сформованими елементами, придатна для подальшого монтажу радіочастотних компонентів.

4.4 Розробка і виготовлення корпуса антени

Для виготовлення корпусу антени необхідно виконати його складальне креслення. Корпус повинен відповідати всім геометричним розмірам, повинен складатися з двох частин, щоб при необхідності його можна було з легкістю розібрати, але також повинні бути засувки для надійної фіксації. Для НВЧ роз’єму SMA має бути передбачений отвір у підставі корпусу. На зовнішній стороні корпусу зроблено поглиблення, на якому вказується робочий діапазон антени. 3-D модель корпусу зображена на рисунку 4.4.

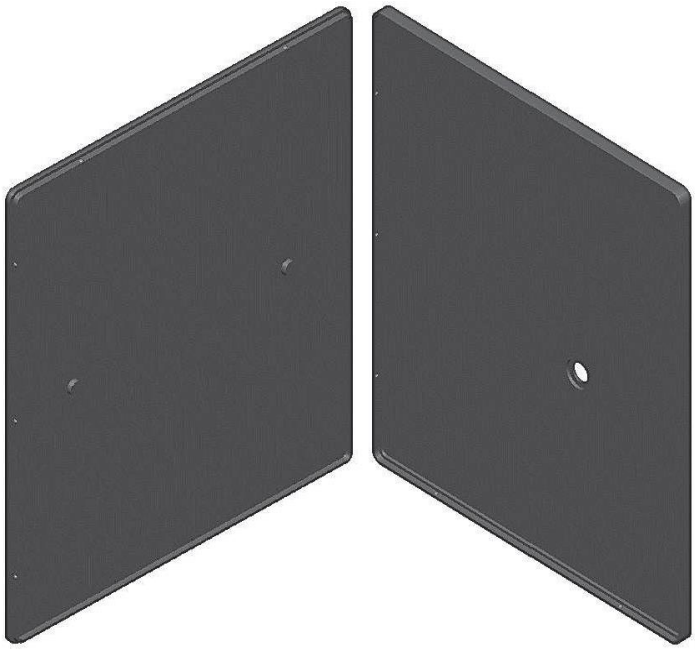


Рисунок 4.4 – Корпус виготовленої антени

У складальному кресленні ж перевіряється правильність дотримання геометричних розмірів корпусу (рис. 4.5).

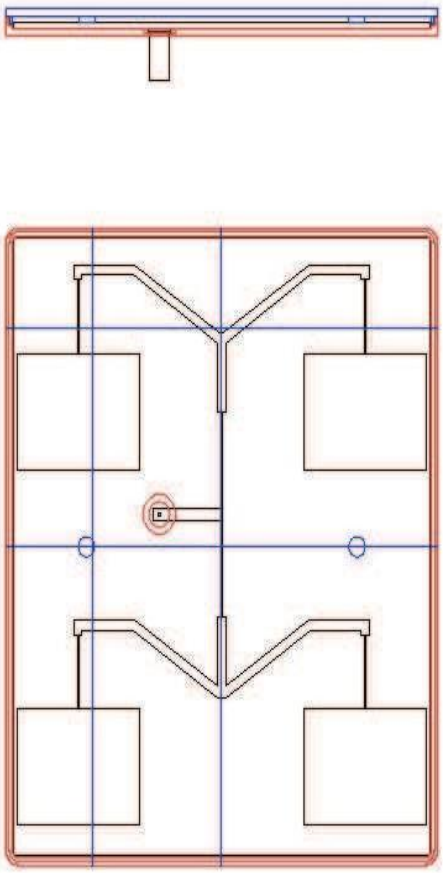


Рисунок 4.5 – Складальне креслення антени 2300-2400 МГц

Виготовлення корпусу відбувається на 3D принтері Ultimaker 2+ (рис. 4.6). Це раціональний спосіб виготовлення корпусу на стадії розробки.

Рисунок 4.6 Зовнішній вигляд 3D принтера Ultimaker 2+

На рисунках 4.7-4.9 представлені зовнішній вигляд роздрукованих корпусів з внутрішніх та зовнішніх сторін.

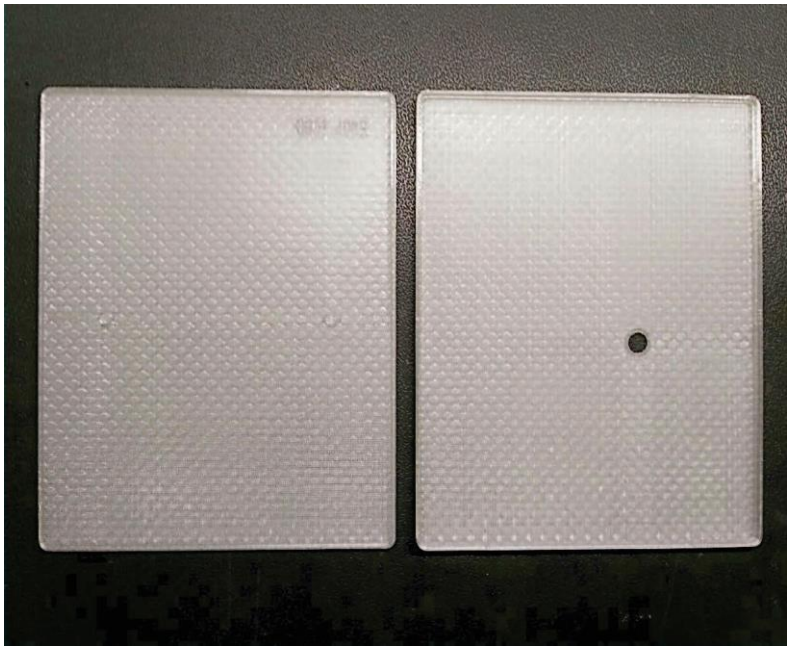


Рисунок 4.7 – Внутрішній вигляд роздрукованого корпуси

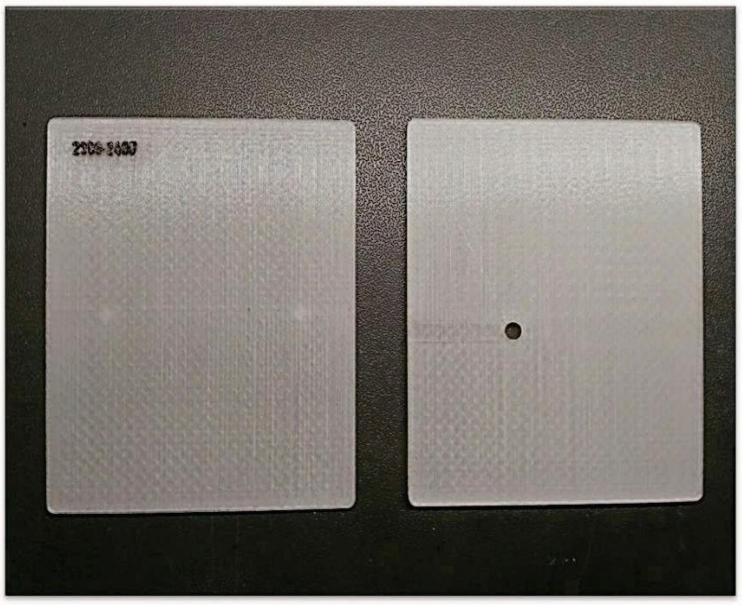


Рисунок 4.8 – Зовнішній вигляд роздрукованого корпуси

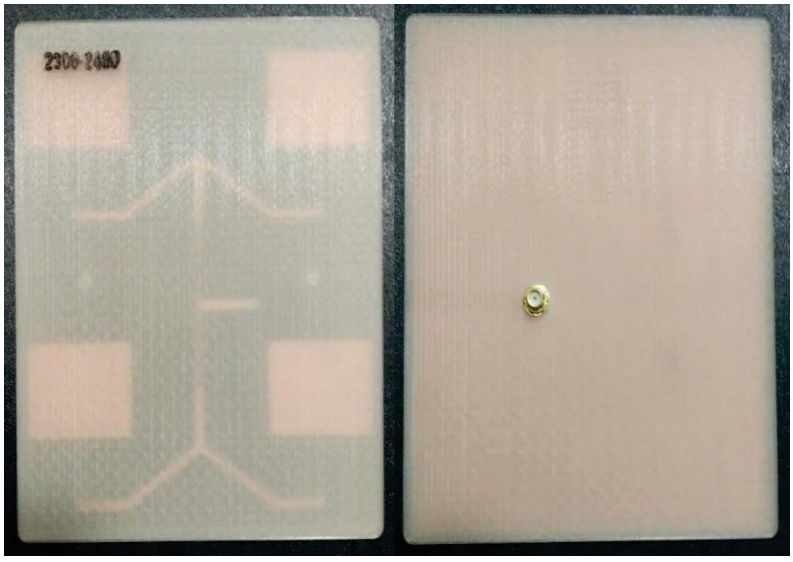


Рисунок 4.9 – Зовнішній вигляд зібраної антени

Для герметичності антени можна зібрати корпус на силіконовий герметик. Антенна, що розробляється пасивний пристрій, тому ймовірність поломки прагне до нуля при герметичній збірці.

4.5 Аналіз реальних параметрів розробленої антени

В якості вимірювального приладу використовувався Keysight FieldFox Handheld Analyzers, завнішній вигляд якого представлений на рисунку 4.10.

Рисунок 4.10 – Портативний аналізатор Keysight FieldFox

Keysight FieldFox Handheld Analyzers – це серія портативних вимірювальних приладів компанії Keysight Technologies, призначених для польових вимірювань у радіочастотних та мікрохвильових системах. Пристрої FieldFox поєднують функції аналізатора спектра, векторного аналізатора кіл, аналізатора кабелів і антен, а також вимірювача потужності. Вони відрізняються високою точністю, міцним виконанням, автономною роботою від батареї та зручністю використання безпосередньо на об’єктах експлуатації, що робить їх придатними для налаштування, тестування й діагностики НВЧ-обладнання.

На рисунку 4.11 показано КСХ виготовленої антени, виміряне в режимі аналізатора кіл.

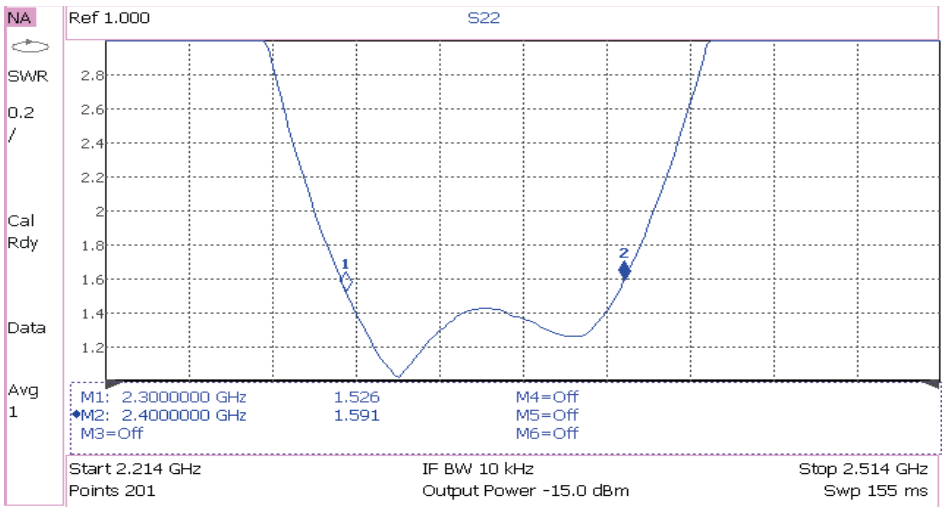


Рисунок 4.11 – КСХ розробленої антени

Максимальне значення виготовленої антени 1,591 на частоті 2,4 ГГц, що відповідає втраті потужності 5,33% від вхідної потужності.

За знятою діаграмою Сміта (рис. 4.12) можна зробити висновок, що вхідний опір антени є близьким до 50 Ом. Це свідчить про добре узгодження антени з лінією передачі та апаратурою, розрахованою на хвильовий опір 50 Ом. За такого узгодження коефіцієнт відбиття на вході антени є малим, що означає мінімальні втрати потужності внаслідок відбиття електромагнітної хвилі.

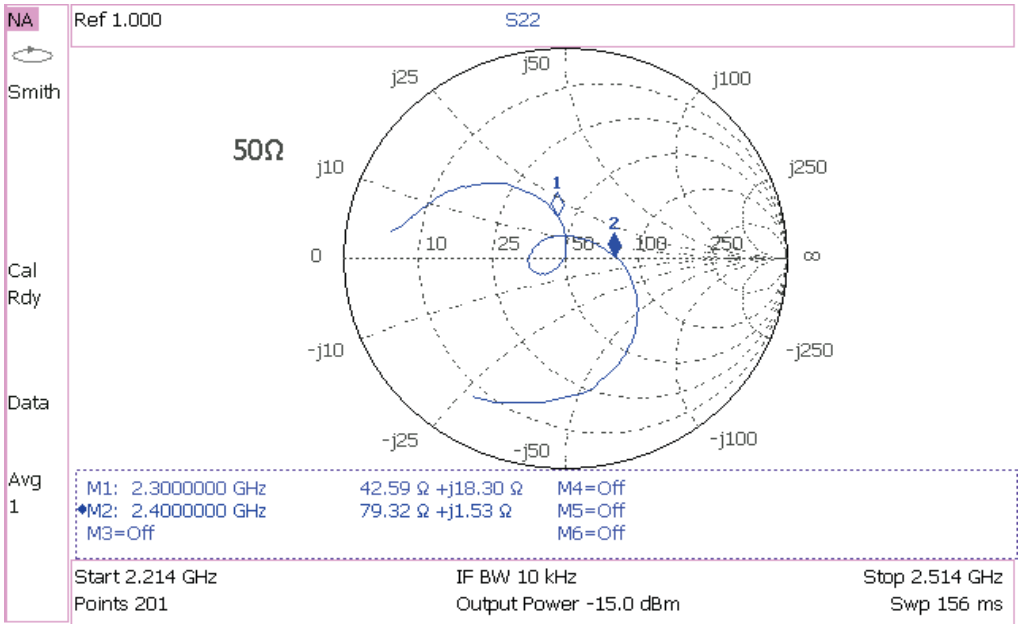


Рисунок 4.12 – Діаграма Сміта

У результаті більша частина підведеної до антени потужності ефективно передається та випромінюється в простір, а коефіцієнт стоячої хвилі за напругою наближається до одиниці. Це забезпечує ефективну роботу антени, підвищує коефіцієнт корисної дії антенно-фідерного тракту та гарантує стабільну сумісність антени з будь-яким пристроєм, вихідний опір якого становить 50 Ом.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проаналізовано особливості функціонування антен у діапазоні 2300-2400 МГц, визначено особливості поширення електромагнітних хвиль, специфіку втрат, узгодження та вимоги до стабільності параметрів у цьому спектрі, що сформувало основу для подальших етапів проєктування.

Обґрунтовано вибір мікросмужкової антени як оптимальної конструкції для заданого діапазону частот, виходячи з вимог до компактності, широкосмуговості, технологічності виготовлення та можливості забезпечення необхідних параметрів коефіцієнта підсилення й узгодження.

Розроблено конструкцію антени з урахуванням електродинамічних властивостей матеріалів, геометричних обмежень та технологічних можливостей виготовлення, визначено ключові розміри елементів та топологію живлення для забезпечення оптимальної роботи в заданому частотному діапазоні.

Виконано моделювання електромагнітних характеристик антени, зокрема КСХ, діаграми спрямованості та коефіцієнта підсилення, що дозволило провести аналіз отриманих результатів і здійснити корекцію конструкції з метою покращення її параметрів.

Оцінено можливість практичного застосування розробленої антени в телекомунікаційних системах, підтверджено відповідність її характеристик технічним вимогам та продемонстровано перспективність використання у сучасних пристроях бездротового зв’язку діапазону 2300-2400 МГц.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. RECOMMENDATION ITU-R M.1036-2 URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1036-2-200306-S%21%21 PDF- E.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 12.09.2025 р.).

2. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу URL: https://duikt.edu.ua/ua/lib/1/category/2122/view/593 (дата звернення 14.09.2025 р.).

3. FCC online table of frequency allocations URL: https://www.fcc.gov/sites/default/files/fcctable.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 15.09.2025 р.).

4. Про внесення змін до Правил надання виробником радіообладнання інформації для споживачів (користувачів) щодо наявності вимог отримання дозволу на експлуатацію радіоелектронних засобів або випромінювальних пристроїв та інших параметрів використання радіочастотного ресурсу України URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z1474- 21?utm_source=chatgpt.com# (дата звернення 15.09.2025 р.).

5. Kulkarni J., Sim Chow-Yen-Desmond et al. Multifunctional and Multiband Planar Antennas for Emerging Wireless Applications. CRC Press, 2024. 398 p.6Base Station Antenna Market Size, Share & Industry Analysis, By Type (Omni Antenna, Sector Antenna, Dipole Antenna, Multibeam Antenna, Small Cell, and Others), By Provision/Sector (Semi-urban, Urban, and Rural), By Technology (3G, 4G/LTE, and 5G), By Application (Mobile Communication, Intelligent Transport, Industrial IoT, Smart City, Military & Defense, and Others), and Regional Forecast, 2025-2032/ URL: https://www.fortunebusinessinsights. com/base-station-antennas-market-103525?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 30.09.2025 р.).

6. Комплект планшетної антени Sota PL12 MIMO 2*2 698-2700 дБ з кабелем і пігтейлами. URL: https://www.gsmsota.ua/ua/antenna-sota-mimo-2-2-698-2700-kabelem-i-pigteylami/ (дата звернення 30.09.2025 р.).

7. Антена панельна ANTEX AX-2513PF. URL: https://instar.com.ua/ua/p1109224681-antenna-panelnaya-antex.html (дата

звернення 01.10.2025 р.).

8. Спіральна антена ENERGY Spiral. URL: https://4g-mereja.com.ua/ua/p2551727314-spiralnaya-antenna-energy.html?srsltid=AfmBOoq- AqokPY11Xp-DRlq4HwLv70wBvGwVpMX77YT8EY1Io8zMgZbs (дата звернення 05.10.2025 р.).

9. Dimensions of IFA antenna. URL: https://www.researchgate.net/figure/dimensions-of-IFA-antenna-L-25mm-G-65mm-h-5-mm_fig4_235631501 (дата звернення 10.10.2025 р.).

10. Дослідження планарної меандрової інвертованої F-антени для технічних засобів систем IoT. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/49738/23196.pdf?sequence=3&isAllowed=y (дата звернення 10.10.2025 р.).

11. Семенов А. О., Семенова О. О., Пінаєв Б. О., Білик О. В., Шпильовий О. О. Дослідження густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 3 2022. С. 13-19.

12. Small Size 2.4 GHz PCB antenna. URL: https://www.ti.com/lit/an/swra117d/swra117d.pdf (дата звернення 12.11.2025 р.).

13. Antenna Magus the key to efficient antenna design with CST studio suite. URL: https://blog.technia.com/en/simulation-antenna-magus-the-key-to-efficient-antenna-design-with-cst-studio-suite?utm.com (дата звернення 15.11.2025 р.).

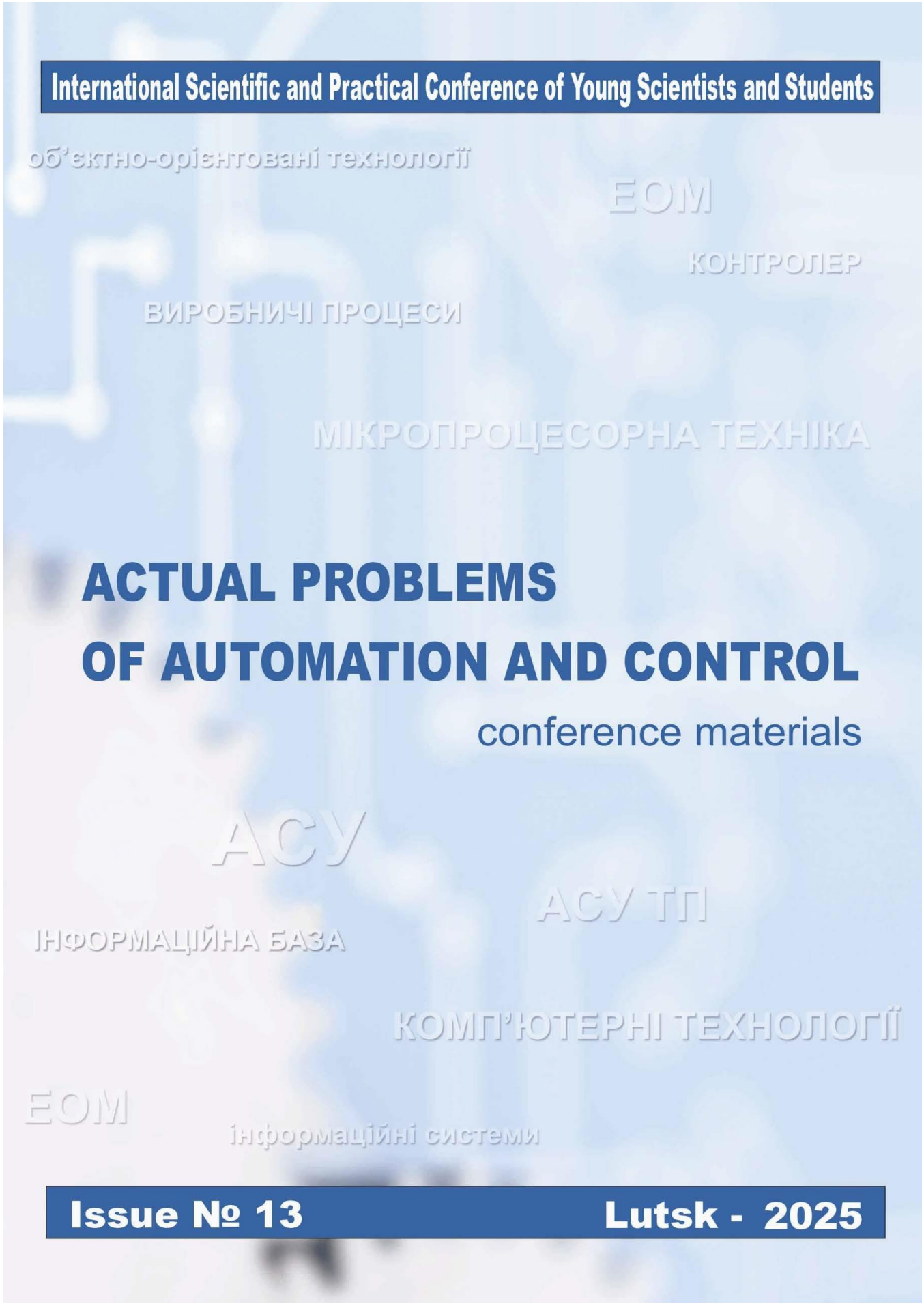
14. Abacom Sprint-Layout 6.0 – Single User Licenses. URL: https://allsoft.ua/p1622684955-abacom-sprint-layout.html?srsltid=AfmBOoritVs_Msv lo8G3uSFQzGWWGFKkmzqMEl8rjCVT4Ng4MbEzzSH0 (дата звернення 12.06.2025 р.).

15. FieldFox Handheld Analyzer Software. URL: https://www.keysight.com/us/en/products/software/application-sw/fieldfox-handheld-analyzer-software.html (дата звернення 30.11.2025 р.).

ДОДАТКИ

Додаток А

Тези доповіді на конференції (копія)



СЕКЦІЯ «МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ»

Крупський О. В., Приходько О. С., Вавринюк К. В. Розробка інструменту для генерації анотованих датасетів для навчання AI-агентів 83
Лишук В., Крутій П., Антонюк В. Найпростіша математична модель однофазного випростувача 86
Міщенко Д. О. Оцінка соціально-економічних переваг впровадження систем управління на базі DC-мікромереж у сільських населених пунктах з альтернативними джерелами енергії 89
Нечипорук Р. О. Система інтелектуальної діагностики стану електроенергетичного обладнання на основі багатосенсорних даних та гібридних моделей штучного інтелекту 92
Стьопкін В. В., Білий В. В., Морозов М. В. Розробка математичної моделі електропривода постійного струму зі спостерігачем стану та пружними ланками 94
Юрченко Ю. В, Заковоротний О. Ю. Підготовка та аналіз джерел фінансових даних, як початковий етап стохастичного моделювання часових рядів методами машинного навчання 99

СЕКЦІЯ «МЕХАТРОННІКА ТА РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ»

Гончар А. В., Охримович М. Б. Вплив технологічних факторів на кінематичну точність циліндричних зубчатих коліс 104
Павлович А. О. Удосконалення комбінованих захоплюючих пристроїв та особливості їх проектування 108
Слабкий А. В., Котик С. І. Аналіз конструкцій та перспективи модернізації універсальних випробувальних машин 114

СЕКЦІЯ «АВТОМАТИКА В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ»

Герман Б. А., Бартошик О. В., Цюпящук Я. В. Дистанційне керування сигналізацією за допомогою модуля GSM 117
Євсюк М. М., Ковалюк Н. В. Розроблення мікроконтролерного терміналу для автоматизованого керування системами вуличного освітлення 121
Заблоцький В. Ю., Гикавий С. В. Розроблення системи відеоспостереження промислового підприємства 124
Лишук В., Денисюк К. Застосування принципів спектрального ущільнення для збільшення пропускної здатності оптоволокна 131
Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О. Аналіз методів регулювання температури для паяльного обладнання 134
Хвищун М. В., Кречик А. П., Хвищун Д. М., Рубльов В. В. Розроблення бездротового комунікаційного пристрою на основі STM32 та LoRa 137
Хвищун М. В., Сидорук В. В., Хвищун Д. М., Бернасюк М. В. Розроблення інтелектуальної системи керування домашнім опаленням з використанням Raspberry Pi 4 142
Шумік А. О., Шибенюк Р. А., Захарчук М.Д., Хвищун М. В. Система розпізнавання голосових команд на базі Raspberry Pi 148
Якимчук Н. М., Карпінський Н. К. Організація UART-комунікації в STM32 для системи комутації кінцевих пристроїв 152
Якимчук Н. М., Лишук В. В. Методологія інтегрованого моделювання та спільного проєктування в сучасних електронних системах 156

СЕКЦІЯ «АВТОМАТИКА В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ»

УДК 681.518
Герман Б. А., Бартошик О. В., Цюпящук Я. В.
Луцький національний технічний університет
E-mail: s.moroz@lntu.edu.ua

ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ СИГНАЛІЗАЦІЄЮ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДУЛЯ GSM

В даній роботі зроблений огляд функціональних особливостей модуля GSM/GPRS Shield на базі SIM900/800. Розглянуті особливості архітектури та принципи роботи GSM-сигналізацій; сформовано вимоги до побудови охоронної системи, що використовує GSM-модуль; запропоновано структурну схему та методику реалізації дистанційного керування сигналізацією. Зроблені висновки щодо ефективності реалізації функцій дистанційного керування та моніторингу в системах охорони, автоматики та інтернету речей.
Ключові слова: дистанційне керування, GSM/GPRS Shield, SIM900/800, передавання данних.

B. Herman, O. V. Bartoshik, Ya. Tsyupyashchuk, Remote control of alarm system using a GSM module. This paper reviews the functional features of the GSM/GPRS Shield module based on SIM900/800. The architectural features and principles of GSM signaling are considered; requirements for building a security system using a GSM module are formulated; a structural diagram and a methodology for implementing remote signaling are proposed. Conclusions are drawn regarding the effectiveness of implementing remote control and monitoring functions in security, automation, and Internet of Things systems.
Keywords: remote control, GSM/GPRS Shield, SIM900/800, data transmission.

Постановка проблеми.

Зростання кількості об’єктів, що потребують постійного моніторингу та охорони, висуває вимоги до створення надійних і доступних систем дистанційного керування охоронними пристроями. Традиційні дротові та локальні бездротові системи сигналізації мають обмежений радіус дії, залежать від стабільності локальної інфраструктури та часто не забезпечують оперативного інформування користувача у разі спрацювання датчиків.

З розвитком мобільних мереж технології GSM стали одним із найефективніших засобів забезпечення віддаленого керування охоронними системами. Зокрема, модулі покоління GSM 900/800 надають можливість передавати повідомлення, здійснювати виклики та приймати команди незалежно від географічного розташування користувача.

Попри доступність GSM-модулів, у практиці проєктування охоронних систем залишається низка невирішених інженерних завдань: забезпечення стабільності каналу зв'язку, мінімізація затримки передачі команд, оптимізація енергоспоживання, захист від несанкціонованого доступу, а також інтеграція GSM-модуля з мікроконтролерними платформами та датчиками охоронної системи.

Отже, актуальною є проблема розроблення та дослідження системи дистанційного керування сигналізацією на базі GSM 900, яка б забезпечувала високу надійність, універсальність, низьку вартість обслуговування та можливість масштабування для різних типів об’єктів.

Огляд актуальних досліджень з проблеми.

Аналіз літературних джерел [1, 2] присвячених розвитку охоронних систем, свідчить про систематичне вдосконалення технічних засобів безпеки та поступовий перехід від традиційних охоронних підходів до інтегрованих, автоматизованих та дистанційно керованих систем. У дослідженнях підкреслюється, що надійність охорони об’єктів дедалі більше залежить від застосування інноваційних електронних компонентів, здатних здійснювати моніторинг і передачу тривожних сповіщень без участі людини. Особливої актуальності ця тенденція набула з розвитком бездротових технологій мобільного зв’язку.

У науково-технічних джерелах [3-5] розглядається широкий спектр охоронних систем: від традиційних централізованих комплексів, що функціонують у взаємодії з воєнізованою охороною, до інтелектуальних систем типу «розумного дому» та комбінованих рішень із використанням відеоспостереження, датчиків руху та контролю доступу. Такі системи забезпечують комплексний

підхід до захисту об'єктів, однак характеризуються високою вартістю розгортання та експлуатації.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділено GSM-сигналізаціям як перспективному напрямку розвитку охоронних технологій. Розвиток стільникових мереж та зниження вартості мобільних модулів сприяли появі багатофункціональних GSM-пристроїв, що стали складовою професійних охоронних комплексів, систем моніторингу транспорту та побутових систем безпеки. GSM-технології забезпечують передавання тривожних сповіщень у вигляді SMS або голосових викликів, а також надають можливість дистанційного керування електронними пристроями на об'єкті.

Публікації підкреслюють, що значний інтерес викликають дослідження стійкості GSM-систем до навмисних завад (глушіння сигналу), оскільки саме цей фактор є одним із ключових ризиків для бездротових охоронних комплексів. Також аналізується роль резервування каналів зв'язку (дві-три SIM-карти, альтернативні канали передачі даних), що дозволяє підвищити надійність сповіщення.

Проведені дослідження свідчать, що GSM-сигналізації набули широкого застосування завдяки низькій вартості, простоті встановлення, універсальності та здатності працювати на значній відстані від об'єкта. Водночас автори акцентують увагу на їхній обмеженій ефективності порівняно з професійними радіоканальними або комплексними охоронними системами, особливо у випадках відсутності стабільного покриття мобільної мережі.

Таким чином, аналіз актуальних джерел підтверджує, що впровадження GSM-модулів у системи охоронної сигналізації є актуальним і перспективним напряком досліджень, який поєднує доступність, функціональність та можливості дистанційного керування. Разом із тим, питання підвищення стійкості до завад, оптимізації енергоспоживання та покращення інтеграції з іншими засобами охорони залишаються відкритими й потребують подальшого науково-технічного розвитку.

Формулювання цілей статті.

Метою статті є обґрунтування доцільності використання GSM-технологій у системах охоронної сигналізації та розроблення підходів до реалізації дистанційного керування охоронними пристроями на основі GSM-модуля. Для досягнення поставленої мети потрібно проаналізувати існуючі підходи та технічні засоби, що застосовуються в сучасних охоронних системах; визначити особливості архітектури та принципи роботи GSM-сигналізацій; сформувати вимоги до побудови охоронної системи, що використовує GSM-модуль як основний або резервний канал зв'язку; запропонувати структурну схему та методику реалізації дистанційного керування сигналізацією, яка забезпечує достатній рівень надійності, інформативності та автономності роботи.

Основна частина.

Одним з варіантів дистанційного керування сигналізацією є використання спеціалізованих модулів GSM 900/800. Модуль GSM/GPRS Shield на базі SIM900/800 призначений для функціонування у мережах стільникового зв'язку стандартів GSM та GPRS і орієнтований на застосування в системах автоматики, моніторингу та дистанційного керування. Взаємодія з мікроконтролерними платформами, зокрема Arduino, здійснюється через інтерфейс UART, що забезпечує сумісність із широким спектром електронних пристроїв. Програмне управління модулем базується на використанні стандартного набору AT-команд, що значно спрощує інтеграцію модуля у вбудовані системи [6-8].

Конструктивно модуль оснащений роз'ємами для підключення зовнішньої антени, мікрофона та навушників, а також тримачем батареї CR1220 для підтримання роботи внутрішнього годинника реального часу (RTC). Крім комунікаційних можливостей, плата SIM900 має 12 універсальних цифрових входів/виходів (GPIO), інтерфейси PWM та ADC, що дозволяє використовувати її як елемент багатофункціональних IoT-систем (рисунок 1).

Плата розширення SIM900/800 виконує функції повноцінного GSM-модему і може реалізовувати більшість функцій звичайного мобільного телефону, включно з передаванням SMS-повідомлень, встановленням голосових з'єднань та обміном даними через GPRS з підтримкою протоколів TCP/IP. Наявність чотиридіапазонної підтримки (850/900/1800/1900 МГц) забезпечує працездатність модуля практично в будь-якому регіоні світу.

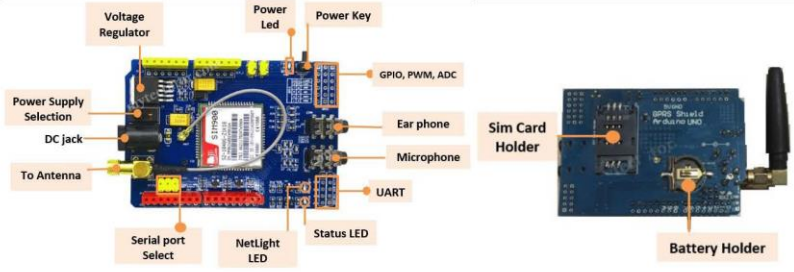


Рисунок 1 – Модуль GSM/GPRS Shield на базі SIM900/800 [6]

Для індикації стану роботи передбачено три світлодіоди: PWR – індикація наявності живлення; Status – індикація активності мікросхеми SIM900; Netlight – індикація стану підключення до стільникової мережі з різними режимами блимання, що відображають реєстрацію в мережі, очікування, активацію GPRS-сеансу тощо.

Однією з ключових вимог до коректної роботи GSM/GPRS модуля є забезпечення його стабільним живленням. Під час передавання даних модуль SIM900 може споживати струм до 2 А, тому використання зовнішнього джерела живлення є обов'язковим. Підключення здійснюється через стандартний роз'єм 5,5 мм, із можливістю вибору джерела живлення повзунковим перемикачем. Діапазон робочої напруги становить 5-9 В, а джерело живлення повинно забезпечувати достатній піковий струм.

Передавання даних між GSM Shield та Arduino здійснюється через інтерфейс UART зі швидкістю 1200–115200 біт/с із підтримкою автоматичного визначення швидкості. Перемичками на платі можна вибрати, які пінові лінії Arduino використовуватимуться: апаратний UART (D0, D1) або програмний послідовний порт (D7, D8) (рисунок 2). Така гнучкість дозволяє оптимізувати роботу системи залежно від використовуваної мікроконтролерної плати.

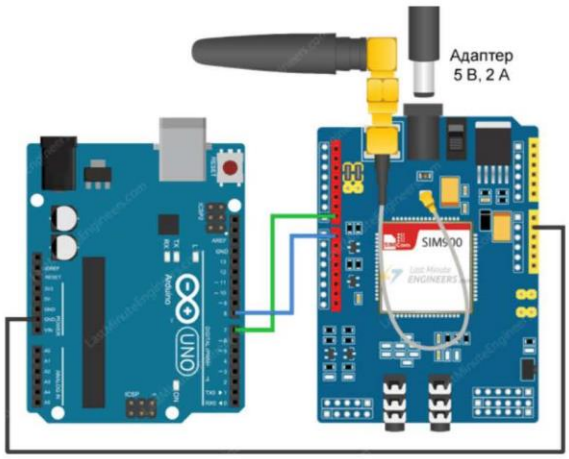


Рисунок 2 – Схема підключення модуля до плати Arduino [7]

SIM900/800 не лише передає дані, але й забезпечує обробку аудіосигналів. Плата обладнана двома роз'ємами 3,5 мм — для мікрофона та навушників. Завдяки підтримці стандартних аудіокодеків (HR, FR, EFR, AMR) реалізується можливість здійснення та прийому голосових дзвінків, а також прослуховування FM-радіо. Підтримуються стандартні електретні мікрофони та гарнітури, сумісні з мобільними телефонами.

На платі передбачено два типи антенних роз'ємів — U.FL та SMA, з'єднаних між собою через патч-кабель. У комплекті постачається зовнішня GSM-антена підсиленням 3 дБі, що забезпечує впевнений рівень сигналу навіть при монтажі плати всередині металевого корпусу.

Для встановлення SIM-картки використовується стандартний повнорозмірний слот,

розташований на зворотній стороні плати. Активована SIM-карта забезпечує доступ до мережевих сервісів, що необхідно для передачі SMS, здійснення викликів та обміну даними.

Модуль SIM900/800 може працювати як автономний годинник реального часу. Функція RTC зберігає час навіть при відсутності основного живлення, за умови встановлення батареї CR1220. Синхронізація часу може виконуватися як оператором мережі, так і вручну за допомогою AT-команди AT+CCLK.

Для запуску GSM/GPRS Shield у системі Arduino необхідно виконати декілька підключень. Зокрема з'єднати TX і RX плати зі штирями D7 і D8 контролера; підключити зовнішнє живлення; об'єднати усі точки "землі"; встановити SIM-картку та підключити антену.

Увімкнення модуля здійснюється за допомогою апаратної кнопки або програмно через подання низького рівня на вивід PWRKEY. Для програмного керування необхідно активувати перемичку R13 та підключити відповідний вихід Arduino.

Програмно-апаратні ресурси SIM900/800 досить добре розвинені, завдяки чому звичний функціонал GSM-модуля має наступні програмні можливості: GSM Location – визначення координат розташування за інформацією про базові станції; SSL – протокол захищених сокетів для забезпечення безпечної передачі даних через мережу; MMS – протокол мультимедійних повідомлень; Jamming Detection – детектування факту «глушіння» GSM-каналу; DTMF decoder – декодування DTMF-тонів; EMAIL – поштовий протокол передачі електронних листів; SMS Autorun – керування роботою модуля за допомогою SMS; PING – функція запиту «відлуння» через Інтернет для перевірки доступності одержувача; AMR Play – функція відтворення аудіо-файлів в динамік або у бік віддаленого абонента під час активного голосового з'єднання; 5MB User Memory – вбудована в модуль пам'ять для даних користувача; Easy Scan – функція отримання інформації про навколишні базові станції без підключення SIM-картки. Застосування цих додаткових функцій може не лише принести економічну вигоду, а й принципово удосконалити споживчі якості кінцевого обладнання GSM

Висновки.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що модуль GSM/GPRS Shield на базі SIM900 є ефективним засобом для реалізації функцій дистанційного керування та моніторингу в системах охорони, автоматики та інтернету речей. Завдяки підтримці стандартів GSM та GPRS, наявності вбудованих стеків TCP/IP, UDP, а також можливості роботи з AT-командами, модуль забезпечує широкі можливості для уніфікованого передавання даних та взаємодії з мікроконтролерними системами, зокрема платформою Arduino.

Конструктивні особливості модуля, включно з наявністю роз'ємів для підключення антени, аудіопристроїв, батареї RTC та SIM-картки, роблять його універсальним рішенням для створення автономних та енергонезалежних систем зв'язку. Забезпечення достатнього рівня живлення та коректного підключення дозволяє стабільно використовувати SIM900/800 у режимах голосового зв'язку, передавання SMS та роботи із GPRS-каналом.

Дослідження показує, що SIM900/800 має оптимальне співвідношення функціональності, надійності та вартості, що робить його доцільним вибором для побудови систем дистанційного керування сигналізацією. З огляду на простоту інтеграції, гнучкість налаштування та наявність широкої підтримки програмних інструментів, модуль залишається одним із найпоширеніших GSM-рішень для практичного застосування в освітніх, наукових та інженерних проєктах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мельник, В. П., Кравчук, В. С. Інженерно-технічні засоби охорони: навчальний посібник. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2016. 256 с.

2. Петрович, О. І., Гаврилюк, Ю. В. Охоронні системи та технічні засоби безпеки: навчальний посібник. Київ: НАУ, 2019. 312 с.

3.Sandia National Laboratories. Physical Security Systems and Equipment. U.S. Department of Energy, 2015. 212 p.

4. Бровко, А. О., Вознюк, С. М. Розвиток технічних засобів охорони в контексті сучасних викликів безпеки // Право і безпека. 2020. № 4. С. 72–79

5. Fischer, R. J., Halibozek, E. P., Walters, D. C. Introduction to Security. 10th ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2019. 688 p.

6. SIM900 GSM/GPRS Shield with Arduino. URL: https://mytectutor.com/sim900-gsm-gprs-shield-with-arduino/ (дата звернення 19.11.2025).