ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Проект антен для комплексів радіоелектронної боротьби»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Сергій ПАВЛЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)*

Виконав: здобувач вищої освіти гр.
Сергій ПАВЛЕНКО
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: Сергій МАРКОВ
к.т.н., доцент *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Рецензент:
_____ _____
(науковий ступінь, вчене звання) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі _____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Павленку Сергію Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Проект антен для комплексів радіоелектронної боротьби
керівник кваліфікаційної роботи Сергій МАРКОВ, к.т.н., доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від « 30 » жовтня 2025 р. № 467.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
1) матеріали по різним типам антенних пристроїв;
2) вимоги до антенних пристроїв засобів радіоелектронної боротьби;
3) дані по існуючим антенним пристроям радіоелектронної боротьби;
4) матеріали з поширення в атмосфері радіохвиль різних діапазонів;
5) вихідні дані для розробки проекту антени та з технології її виготовлення.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1) вступ;
2) особливості поширення радіохвиль різних діапазонів в атмосфері;
3) типи та конструкції антен, що використовуються в засобах радіоелектронної боротьби;
4) розрахунок антен для засобів радіоелектронної боротьби;
5) характеристики антен, що використовуються в засобах радіоелектронної боротьби ;
6) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу: ___презентація на 10 слайдах_____

6. Дата видачі завдання «_01_» _жовтня_ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	05.10.2025	
2	Особливості антен, що призначені для радіоелектронної боротьби	10.10.2025	
3	Аналіз існуючих антенних пристроїв	15.10.2025	
4	Розробка штирової широкосмугової антени	30.10.2025	
5	Розробка антени типу «конюшина»	15.11.2025	
6	Методи вимірювання характеристик антен	10.12.2025	
7	Висновки та оформлення роботи	25.12.2025	

Здобувач вищої освіти _____ Сергій ПАВЛЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник роботи _____ Сергій МАРКОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 75 стор., 41 рис., 3 табл., 25 джерел.

Мета роботи – розрахунок конструкції та креслень антен для засобів радіоелектронної боротьби, розрахунок основних характеристик розроблених антен.

Об’єкт дослідження – антенні пристрої для засобів радіоелектронної боротьби.

Предмет дослідження – методи розрахунку та побудови антен для засобів радіоелектронної боротьби.

Короткий зміст роботи: у роботі зроблений огляд видів антен, що використовуються в засобах радіоелектронної боротьби; проведено розрахунки та розроблено один з видів антен для заданого діапазону частот; розраховані характеристики розробленої антени та описані методи вимірювання цих характеристик.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АНТЕНИ ВИСОКИХ ЧАСТОТ, АНТЕНА «КОНЮШИНА», АНТЕНА HELIX, АНТЕНА «ПАВУК», КОЕФІЦИЄНТ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ, СПРЯМОВАНІСТЬ ВИПРОМІНЮВАННЯ.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work:
75 pages, 41 pictures, 3 table, 25 sources.

The purpose of the work is to calculate the design and drawings of antennas for electronic warfare equipment, to calculate the main characteristics of the developed antennas.

The object of the study is antenna devices for electronic warfare equipment.

The subject of the study is methods of calculating and constructing antennas for electronic warfare equipment.

Summary of the work: the work provides an overview of the types of antennas used in electronic warfare equipment; calculations are made and one type of antennas are developed for a given frequency range; the characteristics of the developed antennas are calculated and methods for measuring these characteristics are described.

KEYWORDS: HIGH FREQUENCY ANTENNAS, CLOVER ANTENNA, HELIX ANTENNA, SPIDER ANTENNA, STANDING WAVE COEFFICIENT.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ

ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Павленко С.О. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: « Проект антен для комплексів радіоелектронної боротьби».

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Павленко С.О. під час написання роботи проявив себе як вдумливий та допитливий фахівець, показав гарну теоретичну підготовку. За короткий час їм було опрацьовано значну кількість літератури з теорії та практики антенної техіки та проведені необхідні розрахунки. Працюючи над завданнями, які доручалися керівником роботи, студент проявив ініціативу творчість і спроможність до інженерної праці.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Павленко С.О. на оцінку « відмінно » та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник роботи _____ Сергій МАРКОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Павленко С.О. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну роботу на здобуття освітнього рівня магістра

здобувача вищої освіти Павленка Сергія Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему «Проект антен для комплексів радіоелектронної боротьби»

Актуальність

Наразі є технічні пристрої, що атакують з повітря та керуються по радіоканалу, виникає задача пригнічення управління цих апаратів засобами радіо електронної боротьби (РЕБ). Одним з важливіших елементів РЕБ є антенні пристрої, тому задача розробки ефективних антен для засобів РЕБ є актуальною.

Позитивні сторони

Вирішені задачі, що поставлені в завданні на розробку, а саме: проведений аналіз антен різного типу, які використовуються в засобах РЕБ боротьби; проведені розрахунки та розроблені два типи антенних пристроїв; для цих пристроїв розроблені креслення та проведені розрахунки характеристик; описані методи вимірювання характеристик антен.

Всі розділи роботи виконані на високому рівні. Пояснювальна записка написана чітко і зрозуміло, графічна частина оформлена з використанням комп'ютера, основні розрахунки виконані також за допомогою засобів обчислювальної техніки.

Недоліки

1. Відсутнє посилання на експериментальні дані.
2. ___

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи.

Висновок: *кваліфікаційна магістерська робота заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Павленко С.О. заслуговує присвоєння кваліфікації:*

Магістр з електронний комунікацій та радіотехніки.

Рецензент: _____ _____ _____

(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....9
ВСТУП.....10
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНТЕННИХ ПРИСТРОЇВ.....11
1.1 Функції антен, їх характеристики та параметри..... 11
1.2 Антена, як навантаження генератора..... 12
1.4 Антенні пристрої для радіо зв'язку та радіо локації..... 25
1.5 Антени для засобів радіоелектронної боротьби..... 37
2 РОЗРОБКА АНТЕНИ ДЛЯ ЗАСОБІВ РЕБ.....43
2.1 Антена типу «конюшина» для засобів РЕБ..... 43
2.2 Розробка та технологія виготовлення антени «конюшина»..... 49
3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ АНТЕННИХ ПРИСТРОЇВ..... 55
3.1 Задачі, принципи та структура моделювання антенних пристроїв..... 55
3.2 Розвиток методів моделювання..... 57
3.3 Приклади програмних засобів та их применения..... 58
4 ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕН.....64
4.1 Методи вимірювання..... 64
4.2 Вимірювання параметрів антен..... 65
4.3 Векторний аналізатор та інші прилади для вимірювання антен..... 67
ВИСНОВКИ.....72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....73
ПРЕЗЕНТАЦІЯ.....76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Скорочення	Повне формулювання
РЕБ	Радіо електронна боротьба
ККД	Коефіцієнт корисної дії
ХН	Характеристика направленості
ДН	Діаграма направленості
КНД	Коефіцієнт направленої дії
ДГ	Диполь Герца
ЕМП	Електромагнітне поле
ОНЧ, НЧ, СЧ, ВЧ, УВЧ, НВЧ	Діапазони частот
ЕМХ	Електромагнітні хвилі
СЕВ	Симетричний електричний вібратор
НЕВ	Несиметричний електричний вібратор
ДА	Директора антена
КСХ (Н)	Коефіцієнт стоячої хвилі (за напругою)
БПЛА	Безпілотний летальний апарат
ФАР	Фазована антенна решітка
АФП	Антенно-фідерні пристрої
GPS/ГНСС	Глобальна навігаційна супутникова система
FPV	First Person View – пристрій, що передає відео в реальному часі
HFSS	High Frequency System Simulator (ВЧ системний симулятор) – програмний продукт для моделювання антен

ВСТУП

Наразі в Україні відбуваються широкомасштабні бойові дії. Сучасні воєнні дії відрізняються від попередніх широким застосуванням малої авіаційної техніки – бойових дронів. Для захисту від бойових та розвідувальних дронів використовуються різні технічні засоби. Дуже ефективним засобом захисту є використання методів радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Одним з найбільш поширених та простих методів радіоелектронної боротьби є пригнічення засобів радіоуправління дронами. Для цього використовуються достатньо потужні генератори у відповідних діапазонах частот. Такий генератор випромінює широкосмуговий сигнал заваду. Для забезпечення ефективної роботи пристрою, що пригнічує сигнал управління дроном, необхідно передати через передавальну антену якомога більшу потужність в напрямку ворожого дрону. Для цього необхідно створити антену для завданого діапазону частот та забезпечити добре узгодження антени з передавачем або кабелем.

Така антена має задовольняти ряду вимог, а саме: працювати в достатньо широкому діапазоні частот, мати достатньо широку діаграму спрямованості, створювати таке випромінювання, яке пригнічує сигнали різної поляризації; бути компактною, легкою, дозволяти монтаж на автомобілі, бути технологічною у виготовленні та бути в цілому дешевим виробом.

В роботі розглянуто декілька конструкцій антен для засобів РЕБ, але основна увага приділена антенам типу: конюшина, об’ємний штир, хелікс. Для цих антен проведені розрахунки конструктивних елементів для завданого діапазону частот та розрахунки діаграм спрямованості, виготовлені експериментальні зразки та проведені електричні вимірювання. За результатами випробування експериментальних зразків проведене порівняння та зроблені рекомендації по видам застосування відповідних антен в різних умовах експлуатації.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АНТЕННИХ ПРИСТРОЇВ

1.1 Функції антен, їх характеристики та параметри

Антену можна характеризувати рядом загально-технічних та економічних показників, до яких відносяться наступні: габарити, складність конструкції, вартість виготовлення, надійність роботи, довговічність та інші [1-7]. Ці показники характеризують антену з загально технічної точки зору, але антена, як елемент радіотехнічного комплексу, повинна мати певні специфічні функції. Антена має вирішувати дві основні задачі: 1) перетворення енергії електромагнітного поля, що створюється генератором та передається по лінії передачі, в енергію електромагнітних хвиль, що поширюються у вільному просторі (це передавальна функція антени); зворотна задача (приймальна функція антени) - перетворення енергії електромагнітних хвиль в вільному просторі в енергію хвиль в напрямної системі (лінії передачі); 2) випромінювання радіохвиль в певну частку простору (в певному напрямку) із заданою поляризацією (режим передачі) або виділення корисних сигналів, які приходять із заданого напрямку та мають визначену поляризацію (режим прийому).

Виконання цих функцій оцінюється певними електродинамічними показниками (характеристиками і параметрами). Характеристики - це функціональні залежності, а параметри – як правило числові величини. Залежність потужності випромінювання від кута в горизонтальної площині має назву горизонтальна характеристика спрямованості, а кут, в межах якого передається понад 50% потужності має назву ширина діаграми спрямованості.

В таблиці 1.1 наведено перелік основних характеристик та параметрів антен, які розділені відповідно до вказаних функцій. Цей перелік не є повним, а містить тільки основні параметри, які дозволяють оцінити якості антени. Інші параметри, які зустрічаються в теорії та техніці антенних пристроїв різних типів, носять специфічний характер та розглядаються для окремих типів антенних пристроїв. При визначенні

параметрів в більшості випадків антену розглядають як передавальну. Параметри приймальних антен визначаються за допомогою теореми взаємності, яка застосовується до передавальних антен.

Таблиця 1.1

Функції, характеристики та параметри антен

Функції	Характеристики	Параметри
Перетворення енергії, що передається по лінії, в енергію полів, які випромінюються у вигляді електромагнітних хвиль	Залежність потужності, що випромінюється від частоти Залежність коефіцієнта стоячої хвилі від частоти	Максимальна потужність Коефіцієнт корисної дії Опір випромінювання Опір втрат Смуга робочих частот
Формування діаграми спрямованості	Діаграма спрямованості Поляризаційна діаграма	Коефіцієнт направленої дії Діюча поверхня Смуга робочих частот

1.2 Антена, як навантаження генератора

Антена, як елемент передавальної системи (передача енергії з лінії передачі в вільний простір), має прийняти з лінії передачі максимальну енергію, тому потрібно з’ясувати умови, при яких таке явище має місце.

Розглянемо передавальну антену, яка підключена до виходу генератора високої частоти, яка здійснює перетворення його енергії в енергію випромінювання (рис. 1.1). Як навантаження генератора, передавальна антена характеризується активною, реактивною та граничною потужністю і вхідним опором [1, 4, 8]. Генератор також характеризується внутрішнім опором, який має активну та реактивну складові.

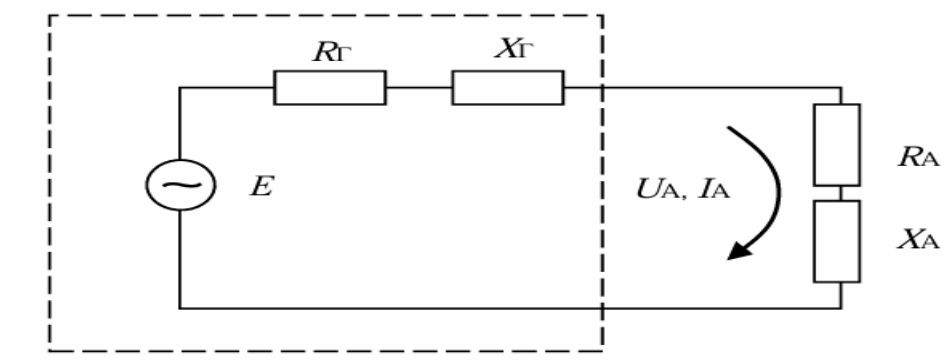


Рис.1.1 Еквівалентна схема з’єднання антени та генератора

Вхідним опором антени називається відношення комплексних амплітуд (або діючих значень) напруги та струму або повної потужності до квадрата діючого значення струму на вході антени.

$$Z_{\text{A}} = \frac{U_{\text{A}}}{I_{\text{A}}} = \frac{P_{\text{пов}}}{I_{\text{A}}^2}. \quad (1.1)$$

В загальному випадку вхідний опір представляється комплексною величиною:

$$Z_{\text{A}} = R_{\text{A}} + iX_{\text{A}}, \quad (1.2)$$

яка складається з активної та реактивної компонент. Як відомо, повна потужність в антені складається з потужності випромінювання та потужності втрат , які витрачаються на нагрівання металевих та діелектричних частин антени, втрати в землі та навколишніх предметах:

$$P_{\text{пов}} = P_{\text{випр}} + P_{\text{втр}}. \quad (1.3)$$

Випромінювана потужність являє собою потік вектору Пойнтінга через деяку замкнену поверхню, яка оточує антену:

$$P_{\text{випр}} = \oint_S \overline{\Pi} d\overline{S}. \quad (1.4)$$

В загальному випадку вектор Пойнтінга є комплексною величиною:

$$\overline{\Pi} = \frac{1}{2}\left[\overline{E} \times \overline{H}\right], \quad (1.5)$$

де використано комплексні амплітуди векторів електричного E та магнітного H полів. В ближній зоні диполя Герца, на відстанях , вектори E та H зсунуті за фазою один відносно одного. Це положення можна рахувати справедливим для кожної антени, оскільки її можна представити сукупністю диполів. Таким чином, якщо замкнена поверхня розташована в безпосередній близькості від антени, де вектор Пойнтінга є комплексним, то і випромінювана потужність буде складатися із активної (потужності випромінювання) і реактивної частин:

$$P_{\text{випр}} = P_{\Sigma} + iP_{\text{р}}. \quad (1.6)$$

В дальній зоні диполя Герца, на відстанях $r >> \lambda/2\pi$, де вектори складових

електромагнітного поля синфазні, вектор Пойнтінга є дійсною величиною. Рахуючи, що ця умова виконується для кожної антени, яка є сукупністю диполів Герца, можна знайти тільки одну складову потужності випромінювання. Для цього необхідно вибрати замкнену поверхню S у дальній зоні, на значній відстані від антени. Тобто, в самому загальному випадку повну потужність в антені можна вважати рівною

$$P_{\text{повн}} = P_{\text{випр}} + P_{\text{втр}} = P_{\Sigma} + P_{\text{втр}} + iP_{\text{р}}. \tag{1.7}$$

Якщо обидві частини виразу розділити на I_A^2, то отримаємо

$$Z_{\text{A}} = R_{\Sigma} + R_{\text{втр}} + iX_{\text{A}}, \tag{1.8}$$

де R_{Σ} – опір випромінювання; $R_{\text{втр}}$ – опір втрат; X_{A} – реактивний опір, причому вхідний опір та його складові знаходяться за допомогою формул (6.6) та (6.8) в тих точках антени, для яких взято значення струму I_{A}. Потрібно мати на увазі, що потужність та опір втрат характеризують перетворення електричної енергії в теплову. Потужність і опір випромінювання мають електродинамічний характер. Справа в тому, що електромагнітне поле, створене антеною, наводить конкретну ЕРС в різних частинах самої антени. Фази ЕРС в різних точках антени можуть бути різними. Тому результуюча ЕРС на клемах антени зсунута відносно струму збудження на кут, який відрізняється від 90°. Цим антена відрізняється від котушки індуктивності. Складова ЕРС індукції, протифазна струму антени, врівноважує ЕРС генератора високої частоти, яка синфазна струмові I_{A}. Це і обумовлює виникнення активного опору випромінювання, як деякої витрати потужності генератора на подолання реакцій поля, тобто на утворення випромінювання. Складова ЕРС, яка зсунута відносно струму на 90°, викликає виникнення реактивного опору антени, який аналогічний дії реактивного навантаження. З формул (6.7) та (6.8) випливає, що:

$$R_{\text{A}} = R_{\Sigma} + R_{\text{втр}}. \tag{1.9}$$

Активна потужність, що витрачається в антені

$$P_{\text{A}} = |I|_{\text{A}}^2 \cdot R_{\text{A}} = \frac{\varepsilon_{\text{Г}}^2 R_{\text{A}}}{(R_{\text{Г}}+R_{\text{A}})^2+(X_{\text{Г}}+X_{\text{A}})^2}. \tag{1.10}$$

що безпосередньо випливає зі схеми, показаної на рис. 6.1. В цій формулі $\varepsilon_{\text{г}}$ –

діюче значення ЕРС, а $R_Г$ і $X_Г$ – складові внутрішнього опору генератора. При узгодженні опорів генератора та антени, коли виконується умова $Z_А = Z_Г^*$, тобто $X_Г = -X_А$, $R_Г = R_А$, генератор віддає максимальну активну потужність:

$$P_{Амакс} = P_{Аузг} = \frac{\varepsilon_Г^2}{4R_А}. \quad (1.11)$$

Якість узгодження характеризується коефіцієнтом узгодження $S_А$, рівним відношенню розвинутої потужності генератора до потужності, що віддається у повністю узгоджене навантаження

$$S_А = \frac{P_А}{P_{Аузг}} = \frac{4R_А R_Г}{(R_А+R_Г)^2+(X_А+X_Г)^2}. \quad (1.12)$$

Ефективність роботи антени як перетворювача енергії оцінюється за допомогою коефіцієнта корисної дії. ККД антени дорівнює відношенню випроміненої потужності до всієї активної потужності, яка витрачається в антені:

$$\eta_А = \frac{P_Σ}{P_А} = \frac{P_Σ}{P_{втр}} = \frac{1}{1+\frac{P_{втр}}{P_Σ}}. \quad (1.13)$$

Таким чином, ККД показує, яка частина потужності, підведеної до антени, витрачається корисно, тобто йде на створення випромінювання. Електричною міцністю називають ту максимальну напругу (або максимальну потужність), яка може бути підведена до антени при зберіганні нормальних умов її роботи (відсутність пробою та неспотворена передача сигналів). Максимальна напруга, як правило, обмежується властивостями діелектриків самої антени та навколишнього середовища. Остання умова особливо важлива для антен літальних апаратів різного призначення, які функціонують в розріджених шарах тропосфери та іоносфери.

1.3 Параметри та характеристики антен

Найважливішою зовнішньою характеристикою антени є її амплітудна **характеристика направленості** (ХН) [3, 4]. Ця характеристика вводиться для того, щоб охарактеризувати розподіл енергії, яка випромінюється антеною, в навколишньому просторі (або її здатність забезпечувати заданий розподіл поля в

просторі). Характеристика направленості – це залежність напруженості електричного поля Е або величини їй пропорційної (потужності Р) від кутових координат (θ і φ) у просторі в дальній зоні на однаковій відстані (r – const) від джерела випромінювання (антени). Це визначення можна записати у наступному вигляді:

$$E(\sim P) = \Psi(\theta, \varphi)\Big|_{r >> \lambda}^{r - \text{const}}.$$

З цього визначення випливає, що ХН можна вимірювати або за напруженістю поля, або за потужністю. Для порівняння ХН різних антен їх нормують, тобто представляють у наступному вигляді (для ХН за напруженістю):

$$F(\theta, \varphi) = \frac{f(\theta, \varphi)}{f_{\max}(\theta, \varphi)},$$

де $f_{max}(\vartheta, \varphi)$ – максимальне значення напруженості. Аналогічно нормується ХН за потужністю.

У відповідності з принципом оборотності для передавальних і приймальних антен, ХН, виміряна в режимі передачі, буде такою ж, як і при роботі антени в приймальному режимі. Графічне зображення діаграми направленості називається діаграмою направленості (ДН). Діаграма направленості (ДН) дозволяє наочно представити розподіл поля в просторі (рис. 1.2). Вона є функцією двох змінних та являє собою поверхню, яка може мати один або декілька максимумів. Найбільший із максимумів, відносно якого проводиться нормування діаграми, називається головним максимумом або головним пелюстком. Інші максимуми називаються бічними пелюстками. В тих випадках, коли має місце максимум в напрямку, протилежному головному, його називають заднім пелюстком. ДН можна побудувати в сферичних, полярних, Декартових системах координатах.

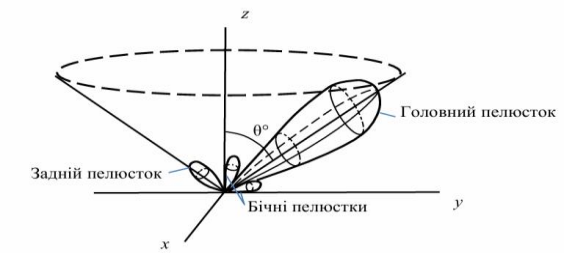


Рис. 1.2 Приклад діаграми направленості антени

За допомогою діаграми направленості вдається не тільки наглядно оцінити направлені властивості антени, але і розрахувати деякі інші параметри. Тому однією із основних задач дослідження антени є розрахунок або експериментальне визначення її діаграми направленості.

У практиці радіозв'язку будь-якого виду відстані, на які передаються сигнали, щонайменше в декілька разів перевищують довжину хвилі і лінійні параметри антени. Ця обставина змушує визначати діаграму направленості на відстанях, що відповідають саме дальній зоні випромінювання антени. Просторове зображення діаграми направленості у вигляді деякої поверхні є незручним. На практиці, як правило, користуються її плоскими перерізами, які проводять через максимум головного пелюстка та точку розташування антени. Звичайно зображуються плоскі перерізи діаграми направленості в тих площинах, в яких головний пелюсток має найбільшу і найменшу ширину (рис. 1.2), або в площинах, які проходять через вектори напруженості електричного та магнітного поля (площина Е та Н). Спрямовані властивості антени оцінюються за шириною головного пелюстка. Цей параметр позначається наступним чином: $2\,\Delta\theta^0_{0,1}$ або $2\,\Delta\theta^0_{0,5}$ (рис. 1.3), де перший вираз означає ширину ДН на рівні 0,1 максимальної потужності, а другий - на рівні 0,5 від максимальної.

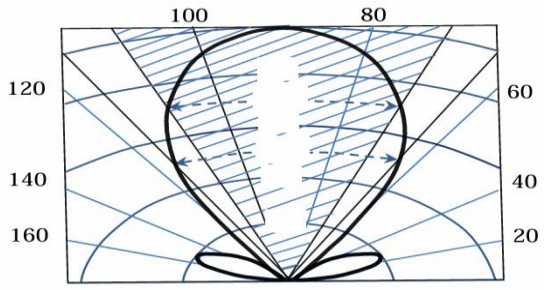


Рис. 1.3 Діаграма направленості антени в полярної системі координат

Ширина діаграми направленості антени за рівнем половинної потужності 0,5 – це кутовий розкрив в межах головного пелюстка на границях якого потужність зменшується в два рази відносно максимального значення. Якщо ж ДН побудована за

напруженістю поля, то відлік її ширини здійснюється за рівнем 0,707 від максимального значення. Залежно від ширини ДН розрізняють антени [8 ,9]:

ненаправлені (випромінювання практично не залежить від кута);

слабо направлені (ширина ДН $180^0 – 30^0$);

направлені (ширина ДН $10^0 – 30^0$);

гостро направлені (ширина ДН становить одиниці градусів).

Діаграма направленості у вибраній площині є плоскою фігурою та зображується в полярній або Декартовій системі координат, при цьому полярні координати використовуються для зображення таких діаграм направленості, які мають достатньо широкий головний пелюсток (рис. 1.3). Діаграма направленості гостро направлених антен, в яких ширина головного пелюстка складає декілька градусів (на практиці), а рівень бокових не перевищує декілька відсотків, зображуються в прямокутній системі координат з використанням по осі ординат квадратичного або логарифмічного масштабів. Знання діаграми направленості дозволяє скласти повну уяву про те, яким чином змінюється в просторі навколо антени амплітуда поля випромінювання.

В залежності від області використання до направлених властивостей використовуваних антен висувають різні вимоги. Для того, щоб порівняти між собою направлені антени, вводиться параметр, що називається **коефіцієнтом направленої дії** (КНД). Величина КНД визначається шляхом порівняння направленості реальної піддослідної антени з ідеалізованою гіпотетичною „ізотропною” антеною, яка випромінює однаково у всіх напрямках (як відомо із електродинаміки, така антена не може бути реалізована). Інколи для порівняння використовують який-небудь інший тип антен, наприклад, диполь Герца, але це завжди спеціально оговорюється. Коефіцієнт направленої дії – параметр, який показує у скільки разів можна зменшити потужність випромінювання направленої антени $P_{\Sigma H}$, порівняно з потужністю випромінювання ненаправленої антени $P_{\Sigma 0}$, щоб на однаковій відстані від джерела поля напруженості полів, що створюються обома антенами, були однакові. Чисельне КНД визначається виразом:

$$D(\theta,\varphi)=\frac{P_{\Sigma 0}}{P_{\Sigma н}}\Big|_{\substack{r-\text{const}\\ E_0=E_н}}.$$

КНД може досягати декількох тисяч та навіть десятків тисяч і в першому наближенні він зворотно-пропорційний ширині головного пелюстка діаграми направленості. У той же час, ширина головного пелюстка не може служити величиною, яка повністю визначає КНД. Наявність навіть незначного бокового випромінювання призводить до суттєвого зменшення КНД. Коефіцієнт направленої дії рівний одиниці (D = 1) означає, що антена рівномірно випромінює у всіх напрямках, тобто мова йде про ізотропну антену. Для елементарного джерела електромагнітного поля у вигляді електричного диполя D = 1,5, для симетричного пів хвильового вібратора D = 1,64, для хвильового симетричного вібратора D = 2,4. Використовуючи КНД можна оцінити, який виграш у потужності випромінювання у порівнянні з ізотропним випромінювачем отримується при використанні направленої антени. Однак потужність випромінювання представляє тільки частину активної потужності генератора, що витрачається в антені. Для оцінки виграшу в потужності генератора, підключеного до реальної антени з втратами, вводиться параметр, який називається коефіцієнтом підсилення.

Коефіцієнт підсилення визначається, як величина, що показує у скільки разів можна зменшити потужність, підведену до антени, якщо замінити ізотропний випромінювач без втрат ($\eta_A = 1$) реальною піддослідною антеною, при умові забезпечення однакової напруженості поля в дальній зоні в заданому напрямку обома антенами. Аналітичний вираз для коефіцієнта підсилення має вигляд:

$$G(\theta,\varphi)=\frac{P_{A0}}{P_{Aн}}\Big|_{\substack{r-\text{const}\\ E_0=E_н}}.$$

Враховуючи, що $P_{\Sigma H} = \eta_A P_{AH}$ та $P_{\Sigma 0} = P_{A0}$ отримуємо:

$$G(\theta,\varphi)=\frac{P_{\Sigma 0}}{P_{\Sigma н}}\eta_A=\eta_A D(\theta,\varphi).$$

З цього виразу видно, що коефіцієнт підсилення антени дорівнює добутку її ККД на КНД та дає можливість здійснити оцінку антени як з точки зору втрат при

трансформаціях енергії поля, так із точки зору виграшу в потужності за рахунок направленої дії. Коефіцієнт направленої дії не може бути менше одиниці (D ≥ 1). Коефіцієнт підсилення, який враховує і ККД антени, може приймати значення менше одиниці. В залежності від того, відносно якої антени проводиться оцінка коефіцієнта підсилення, розрізняють: абсолютний коефіцієнт підсилення (відносно ізотропного випромінювача) та відносний коефіцієнт підсилення (відносно диполя – пів хвильового симетричного вібратора).

При вивченні поля випромінювання антени значний інтерес представляє не тільки його амплітуда, а й фаза та орієнтація векторів поля, зокрема вектору Е. Для того, щоб характеризувати зміну положення в просторі вектору Е у точці спостереження за період високої частоти, вводиться поняття **поляризаційної характеристики**. Поляризація – орієнтація вектору напруженості електромагнітного поля Е в просторі. Розрізняють наступні види поляризації:

лінійна (вертикальна, горизонтальна);

обертаюча (еліптична або кругова правого або лівого обертання).

У загальному випадку вектор Е можна представити у вигляді суми двох лінійно поляризованих компонентів:

$$\overline{E} = \overline{\theta}^{\circ} E_{\theta} + \overline{\varphi}^{\circ} E_{\varphi},$$

де θ^{o} і φ^{o}, – орти сферичної системи координат; E_{θ} і E_{φ} – комплексні амплітуди. Відношення ортогональних складових носить назву поляризаційного коефіцієнта, який визначається виразом

$$P = \frac{E_{\varphi}}{E_{\theta}} = |P| e^{i\psi}.$$

Тоді вираз для поляризаційної діаграми можна записати у вигляді:

$$\overline{E} = \overline{\theta}^{\circ} E_{\theta} + \overline{\varphi}^{\circ} E_{\varphi} = E_{\theta}(\overline{\theta}^{\circ} + P\overline{\varphi}^{\circ}).$$

Площина поляризації – площина, створена вектором Е і напрямком розповсюдження електромагнітного поля. Якщо площина поляризації не змінює своє положення в просторі при розповсюдженні радіохвиль – поляризація лінійна.

Поляризація називається обертаючою, якщо площина поляризації обертається, роблячи один оберт за один період високочастотного коливання поля. **Поляризаційна діаграма** – залежність напруженості електричного поля від кута повороту лінійно-поляризованої антени в площині, перпендикулярній до напрямку розповсюдження електромагнітного поля. **Поляризаційна характеристика** – крива, яка описується кінцем вектору напруженості електричного поля за період коливання в площині, перпендикулярній до напрямку розповсюдження електромагнітного поля.

Для отримання обертаючої поляризації необхідно виконати наступні умови:

1) два джерела поля мають бути ортогональними в просторі;

2) амплітуди цих полів мають бути рівними;

3) фази цих полів мають бути зсунутими одне відносно одного на 90^0.

Якщо усі умови виконуються – поляризація кругова, якщо одна з умов виконується не в повному обсязі – еліптична, якщо хоча б одна умова не виконується – поляризація лінійна (вертикальна або горизонтальна).

Вхідний опір та потужність випромінювання антени. Повний вхідний опір антени Z_A – повний електричний опір, виміряний на вхідних затисках антени [3, 10]. У загальному випадку Z_A є комплексним числом, що визначається як відношення комплексних амплітуд напруги U_A і струму I_A на затисках антени і включає реактивну X_A і активну R_A складові:

$$Z_A = \frac{U_A}{I_A} = R_A + iX_A.$$

Активна складова вхідного опору дорівнює сумі R_Σ та $R_{втр}$, де R_Σ визначається з виразу, що пов’язує потужність випромінювання з модулем струму в даному перерізі антени.

$$P_\Sigma = \frac{R_\Sigma |I_A|^2}{2}.$$

Опір випромінювання можна представити у вигляді фіктивного активного опору, що розсіює потужність, рівну потужності випромінювання, за умови, що струм в електричному колі дорівнює струму антени. Знання вхідного опору і його складових

необхідне для того, щоб забезпечити узгодження антени з лінією її живлення – фідером.

Потужністю випромінювання антени називається активна складова P_{Σ} випромінюваної потужності $P_{\text{випр}}$, яка представляє собою корисну потужність, за допомогою якої в дальній зоні передавальної антени створюється необхідний рівень сигналу для приймальної антени. Реактивна складова потужності $P_{\text{г}}$ існує тільки поблизу антени (випромінювача) і на рівень корисного сигналу не впливає, а визначає реактивний вхідний опір антени.

Діюча довжина антени. Діюча довжина (висота) антени в режимі передачі – довжина уявного лінійного вібратора з синфазним і одноамплітудним розподілом струму, амплітуда якого дорівнює амплітуді струму на затисках даної антени і створює на однаковій відстані в напрямку максимуму випромінювання ту ж напруженість поля, що і дана антена (рис. 1.4).

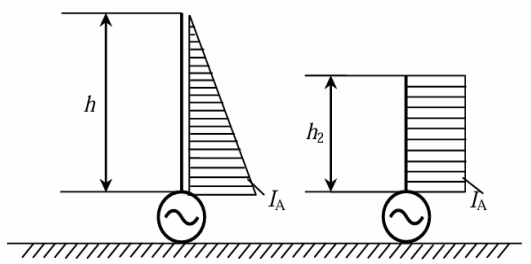


Рис. 1.4 Пояснення поняття діючої довжини (висоти) антени

Діюча довжина антени в режимі прийому – відношення електрорушійної сили ξ_{A}, що наводиться в антені плоскою, узгодженою за поляризацією, радіохвилею, до напруженості поля падаючої радіохвилі в місці прийому:

$$L_{\text{д}} = h_{\text{д}} = h_2 = \xi_{\text{A}} / E \ .$$

Хоч для багатьох антен у вигляді випромінюючих поверхонь поняття діючої висоти втратило своє значення, але для лінійно-протяжних антен роль такого параметра в загальній характеристиці випромінювача є великою.

Ефективна площа прийому антени $A_{\text{еф}}$ – відношення потужності, що

віддається антеною в узгоджене навантаження, до потужності, що припадає на одиницю площі падаючої плоскої хвилі, узгодженої з антеною за поляризацією. При відомому значенні КНД в напрямку максимуму випромінювання D_{max} величина $A_{еф}$ пов'язана з робочою довжиною хвилі λ виразом:

$$A_{еф} = \frac{\lambda^2 D_{max}}{4\pi}.$$

Для антен з випромінюючим розкриттям (рупорним, параболічним) найбільше значення ефективної площі, що дорівнює геометричній площі розкриття S, досягається за умови синфазного і рівно амплітудного розподілу поля в розкритті: $A_{еф} = S$. Отже, $A_{еф}$ можна трактувати як площу розкриття уявної антени з синфазним і рівно амплітудним розподілом поля в розкритті, яка дістає з падаючої хвилі і передає в узгоджене навантаження таку ж потужність, як і дана антена. Коефіцієнт використання площі антени – відношення ефективної площі до геометричної площі розкриття антени: $\gamma = A_{еф}/S$. Коефіцієнт використання площі антени – одна з найважливіших характеристик антени, що визначає її ефективність.

Діапазонні властивості антени. У ряді випадків суттєвим показником в оцінці якості антени є робочий діапазон хвиль, в рамках якого антена може функціонувати, зберігаючи з заданим ступенем точності свої направлені властивості та властивості трансформатора поля. Величина цього частотного діапазону визначається частотною характеристикою антени, під якою звичайно розуміють залежність амплітуди вектору електричного поля в дальній зоні в напрямку головного максимуму діаграми від частоти струму живлення антени при постійній амплітуді напруги на її вході. Аналітично частотна характеристика виражається функцією

$$E_{max} = E(f, U_A), \text{ при } U_A = \text{const}.$$

Причиною зміни амплітуди вектору електричного поля випромінювання при варіації частоти є зміна вхідного опору. Діюча довжина та діаграма направленості, в свою чергу, залежать від частоти коливань генератора.

Діапазонні властивості антени визначаються смугою частот робочого діапазону

($2\Delta f$). Під смугою частот робочого діапазону розуміють інтервал частот від f_{min} до f_{max}, в межах якого антена зберігає свої основні параметри та характеристики (коефіцієнт підсилення, направленість, узгодження і інше) з заданою точністю. Вимоги до збереження одного або декількох з розглянутих параметрів в робочому діапазоні частот залежать від конкретного типу антени. В більшості випадків потрібно зберегти узгодження антени з фідером або забезпечити необхідний коефіцієнт підсилення.

Ширина діапазону (смуга) робочих частот визначається у відсотках відносно середньої частоти діапазону:

$$\frac{2\Delta f}{f_{\text{сер}}} = 2\frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} 100\ \%,$$

де f_{min}, f_{max} – границі частотного діапазону.

За діапазонними властивостями антени класифікують наступним чином:

1) вузько смугові (резонансні) антени, для яких $2\Delta f/f_{\text{середне}} < 10\%$;

2) широкосмугові антени, для яких $10\% < 2\Delta f/f_{\text{середне}} < 40\%$.

При смузі частот $2\Delta f/f_{\text{середне}} > 40\%$ діапазонні властивості оцінюються за коефіцієнтом перекриття, який визначається, як $K_п = 2\ f_{max}/\ f_{min}$;

3) широкодіапазонні (діапазонні) антени, для яких $2 < K_п < 3$;

4) частотно-незалежні (над широкосмугові) антени, для яких коефіцієнт перекриття може складати від декількох одиниць до декількох десятків.

В антенній техніці основну роль при дослідженні частотних властивостей випромінювача грають вхідні опори та діаграма направленості. Тому, в якості частотної характеристики використовується залежність вхідного опору антени від частоти (тобто функція $Z_A\ f(\omega)$) або залежність коефіцієнта стоячої хвилі у фідері від частоти (тобто $K_{ст}(\omega)$).

Робочий діапазон частот конкретної антени встановлюється виходячи з допустимих меж зміни коефіцієнта стоячої хвилі у фідері або ширини головного та рівня бокових пелюстків. Частіше використовується перший з критеріїв, оскільки з його допомогою легше оцінити режим роботи генератора. Так у діапазоні

дециметрових та метрових хвиль мінімальна величина коефіцієнта стоячої хвилі у лінії живлення може досягати 1,5 – 2,0. Для діапазону сантиметрових хвиль, де основним генератором є прилад техніки НВЧ, коефіцієнт стоячої хвилі не повинен, як правило, бути вище ніж величини 1,5.

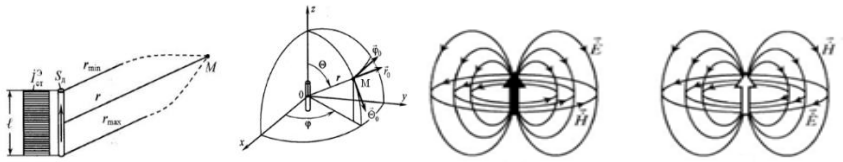
1.4 Антенні пристрої для радіо зв'язку та радіо локації

Антени можуть мати прості та складні конструкції. Навіть у разі простих антен (симетричний електричний вібратор) знаходження поля випромінювання є складним завданням. Визначення електричних характеристик випромінювання довільної антени суттєво спрощується, якщо антена сприймається як сукупність елементарних випромінювачів [1, 11]. Лінійні антени можуть бути представлені у вигляді сукупності елементарних електричних вібраторів, щілинні антени та грати - у вигляді сукупності елементарних магнітних вібраторів, апертурні антени - у вигляді сукупності елементарних двовимірних випромінювачів (елементів Гюйгенса) [2, 5]. Поле випромінювання симетричного електричного вібратора може бути знайдено як результат суперпозиції полів випромінювання диполів Герца, що розташовані вздовж осі вібратора по всій довжині його плечей. Тому далі розглядаються властивості елементарних випромінювачів.

Елементарний електричний вібратор (диполь Герца – ДГ) – це відрізок прямолінійного електричного провідника, розміри якого нескінченно малі порівняно з довжиною хвилі. По ДГ протікає змінний у часі електричний струм із постійною комплексною амплітудою в межах усієї довжини відрізка [1, 8]. На рис. 1.5 наведено вид випромінювача та структура електричного та магнітного полів для електричного та магнітного диполів.

У будь-якій меридіональній площині, що проходить через вісь диполя, його ДН є правильною «вісімкою» (рис. 1.6, а). З огляду на осьову симетрію диполя напруженості полів не залежить від азимутального кута φ, і ДН в азимутальній площині є коло (рис. 1.6, б). Очевидно, що найбільш інтенсивне випромінювання

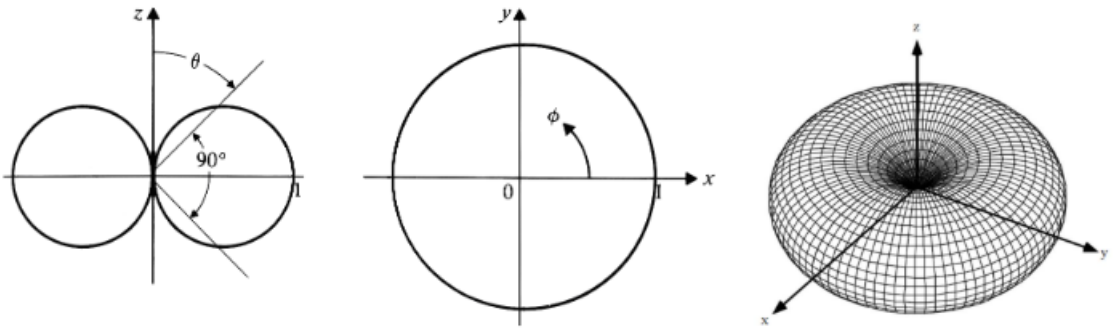
диполь Герца створює в площині перпендикулярної його осі і не випромінює вздовж осі (θ=0º і θ=180º). Тривимірна (об'ємна, просторова) ДН випромінювання диполя є тілом обертання у формі тора (рис. 1.6, в).



а) б) в) г)

Рис. 1.5 Вид диполя (а, б) та структура полів Е та Н для електричного (в) та магнітного (г) диполів

У ближній зоні (в області відстаней до точки спостереження $r \sim \lambda$) ЕМП диполя Герца має складну структуру; поряд з реактивним (коливальним) потоком потужності з'являється активний радіальний потік потужності випромінювання.



а) б) в)

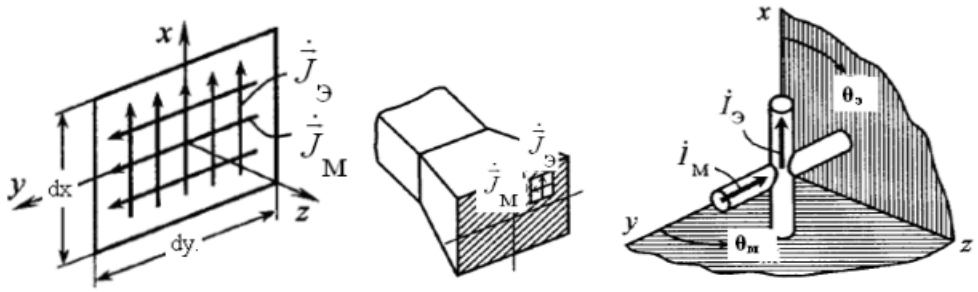
Рис. 1.6 ДН диполя Герца в Е-площині (а), Н-площині (б), просторова ДН (в)

Магнітний диполь є прямолінійним випромінювачем, розміри якого нескінченно малі в порівнянні з довжиною хвилі, по якому протікає змінний у часі магнітний струм з постійною комплексною амплітудою [1, 2]. Магнітний диполь є магнітним аналогом електричного диполя. У природі не існує магнітних струмів, проте є реальні пристрої, що мають властивости магнітного диполя, наприклад,

щілина малих у порівнянні з довжиною хвилі розмірів, прорізана в металевому екрані, елементарна рамка — виток електричного провідника, периметр якого набагато менший за довжину хвилі випромінювання.

Аналіз магнітного диполя проводиться за допомогою принципу перестановної подвійності. При протіканні в диполі магнітного струму замість електричного силові лінії векторів і будуть такими ж, як і силові лінії векторів і ЕМП електричного диполя.

У приймально-передавальної апаратурі багатьох радіотехнічних систем використовуються апертурні антени — рупорні, лінзові, дзеркальні та інші. Випромінювальні розкриви таких антен зручно подати у вигляді сукупності двовимірних (плоских) елементарних випромінювачів - елементів Гюйгенса, плоских майданчиків з розмірами dx і dy, за якими в ортогональних напрямках протікають електричний та магнітний струми постійної амплітуди та фази (рис. 1.7). **Елемент Гюйгенса** є нескінченно малим за площею і плоскою ділянкою хвильового фронту з розмірами dx і dy.



а) б) в)

Рис. 1.7 Елементи Гюйгенса [7]

а) напрям електричного та магнітного струмів; б) розкрив рупора з елементом Гюйгенса на ньому; в) модель елемента Гюйгенса як сума елементарних вібраторів

Вібраторні антени

В теорії антен вібратором називають випромінювач у вигляді тонкого електричного провідника (електричний вібратор) або вузької довжиною щілини, прорізаної в електропровідному (металевому) екрані (магнітний, або щілинний

вібратор) [6, 10]. Вібратори широко застосовуються як самостійні слабо спрямовані антени, і у складі антенних решіток; у комбінації з рефлектором використовуються як односпрямовані антени або опромінювачи дзеркальних та лінзових антен. Робочі частоти вібраторних антен і ґрат зазвичай знаходяться у ВЧ-УВЧ діапазонах, але часто вібратори в смуговому або мікро смуговому виконанні застосовуються і в НВЧ діапазоні.

Під електричним вібратором мається на увазі випромінювач ЕМХ у вигляді лінійного циліндричного провідника радіусу a і з довжиною плечей l_1 і l_2, до внутрішніх торців яких, тобто. у зазорі шириною Δ, підключено джерело ЕРС (рис. 1.8). Вібратор відрізняється від елементарного вібратора довжиною плечей. Вісь z має початок у центрі зазору і спрямована вздовж осі вібратора. Вібратор може бути симетричним (СЕВ), якщо $l_1 = l_2 = l$, та несиметричним (НЕВ) у вигляді штиря висотою h, встановленого над електропровідною площиною. Збудження СЕВ здійснюється симетричною лінією передачі (двох провідної) або несиметричною (коаксіальною), у цьому випадку необхідний симетруючий пристрій.

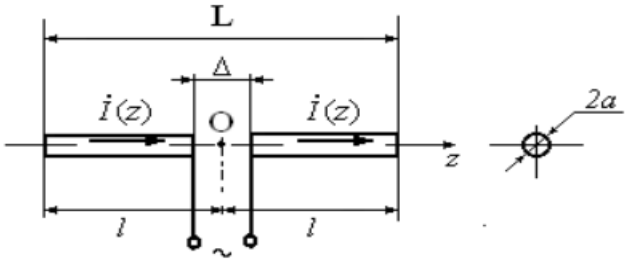
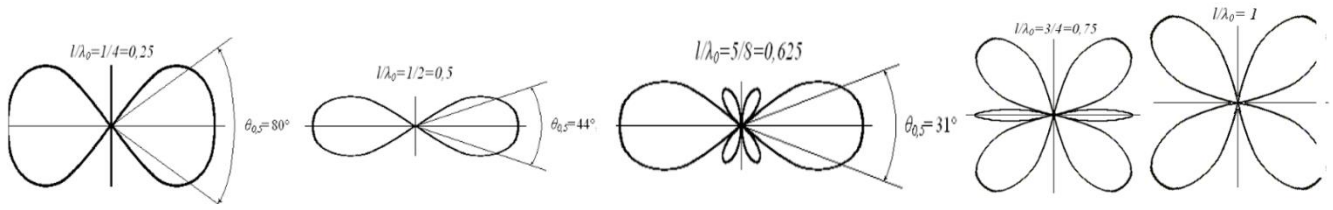


Рис. 1.8 Симетричний електричний вібратор

При аналізі електричних характеристик СЕВ спочатку вирішується внутрішнє завдання теорії антен - з'ясовується розподіл струму по його поверхні; потім вирішується зовнішнє завдання - визначається ЕМП випромінювання та інші характеристики. Вирішення цього завдання добре відоме, тому наведемо лише основні результати – нормовані діаграми спрямованості при різних співвідношеннях довжини вібратора до довжини хвилі випромінювання (рис. 1.9). З рисунку видно, що

ДН вібратора змінюється від діаграми елементарного вібратора до складнішої діаграми вібратора з великою довжиною плечей.



а) б) в) г) д)

Рис. 1.9 Нормовані ДН СЕВ у площині Е для різних значень *l/λ*

Енергія, що запасена в ближній зоні вібратора, буде тим більшою, ніж тонші його плечі. Тому при необхідності одержання широкої смуги робочих частот СЕВ (зі слабкою залежністю від частоти) слід використовувати товсті вібратори з плечами великого радіусу.

Прикладом широкосмугового вібратора є діапазонний вібратор Надененка (рис. 1.10), циліндричні плечі якого мають великий діаметр і зазвичай виконуються у вигляді набору провідників. Такі антени широко застосовуються як приймально-передавальні в стаціонарних системах радіозв'язку ВЧ діапазону (на декаметрових хвилях) [1].

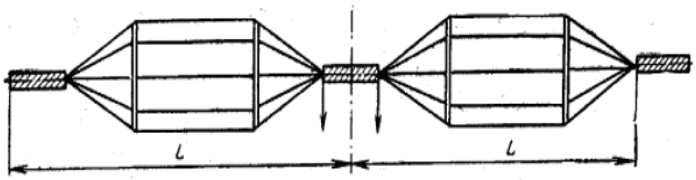


Рис. 1.10 Діапазонний вібратор Надененка

Вхідний опір СЕВ залежить від конструкції його підключення до лінії живлення, як і у випадку багатьох інших антен. Тому при проектуванні антен розрахунки їх вхідних опорів носять, як правило, оціночний характер та уточняються шляхом комп'ютерного моделювання антен за допомогою спеціалізованих програм та експериментальних досліджень характеристик дослідних зразків антен.

Прості антени у вигляді вібратора з рефлектором або директором, формують односпрямоване випромінювання та не дозволяють отримувати вузькі ДН та КНД більше кількох одиниць дБ. Найбільшу спрямованість мають директорні антени або антени типу «хвильовий канал» (антени Уда-Яги), що є дискретною системою розташованих в одній площині паралельних симетричних вібраторів, розміри яких близькі до напів хвильових. У діапазоні 100-1000 МГц директорні антени (ДА) виконуються з металевих стрижнів або трубок, на більш високих частотах - за друкованою (смуговою) технологією. Приклад поширеної конструкції ДА показаний на рис. 1.11 [1, 4].

Активний вібратор 3, звичайний напів хвильовий з власним вхідним резонансним опором 73 Ом або петльовий вібратор з підвищеним резонансним опором 292 Ом, підключається до живильної лінії передачі. Пасивний вібратор 1, розташований позаду активного, грає роль рефлектора, інші вібратори 2, наявні попереду активного, називаються директорами. Рефлектор і директори можна безпосередньо з'єднувати в центрах з металевим стрижнем, що несе, який не збуджується через те, що при роботі антени орієнтований перпендикулярно силовим лініям вектору напруженості електричного поля. Для захисту вхідних ланцюгів приймачів від грозових розрядів стрижень заземлюється. Якщо активним вібратором використовується звичайний РЕВ, то його плечі повинні бути ізольовані від несучого стрижня; у разі петльового вібратора його можна безпосередньо з'єднувати з стрижнем, що несе, в середній точці (нульового потенціалу).

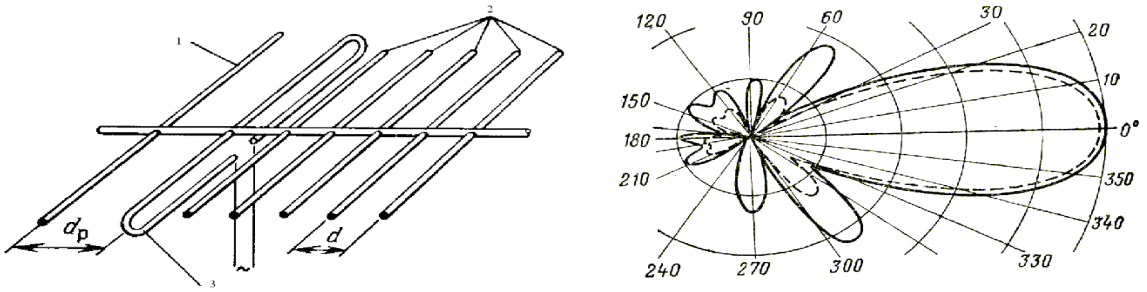


Рис. 1.11 Директорна антена та приклад її ДН

1 - рефлектор, - директори, 3 - активний симетричний вібратор

ДА прості і зручні в експлуатації, тому широко застосовуються як приймальні телевізійні антени в метровому і дециметровому діапазонах хвиль; решітки ДА застосовуються у радіолокаційних системах. У сантиметровому діапазоні вони використовуються як елементи ФАР. Особливістю антен подібного типу є вузька смуга частот (смуга пропускання не більше кількох відсотків).

ДА випромінює ЕМХ з лінійною поляризацією в площині, в якій розташовані вібратори.

Приклад експериментально отриманої ДН ДА із шістьма директорами наведено на рис. 1.11 у площині, перпендикулярній осям вібраторів (суцільна лінія) та у площині вібраторів (пунктирна лінія) [1, 4].

Зі збільшенням кількості директорів (зі збільшенням повної довжини антени) ширина ДН в обох площинах зменшується. Мінімальна ширина ДН ДА за рівнем половинної потужності становить 15-20 °, що можна досягти при забезпеченні оптимальних співвідношень між струмами у вібраторах.

Кількість директорів вибирається не більше 10-15; при цьому КНД досягає в середньому 12-15 дБ. Подальше збільшення кількості директорів не робить істотного впливу на ДН, оскільки наведені струми в крайніх директорах стають малими та їх внесок у формування ДН слабшає. Рівень бічних пелюсток ДН директорних антен досить високий і може досягати 5-3 дБ.

Несиметричним називається вібратор, у якого одне плече за розмірами або формою відрізняється від іншого. Насправді широко застосовуються несиметричні вертикальні заземлені вібратори (НЕВ), рис. 1.12. Заземлений НЕВ є вертикальним по відношенню до землі або до будь-якої металевої поверхні відрізок електричного проводу, до нижнього кінця якого підключений «сигнальний» полюс генератора, а загальний провід генератора заземлений або приєднаний до металевого об'єкта (корпусу автомобіля і т.д.). Роль другого плеча вібратора грає поверхню Землі чи металева поверхню об'єкта-носія антени (дзеркальне зображення).

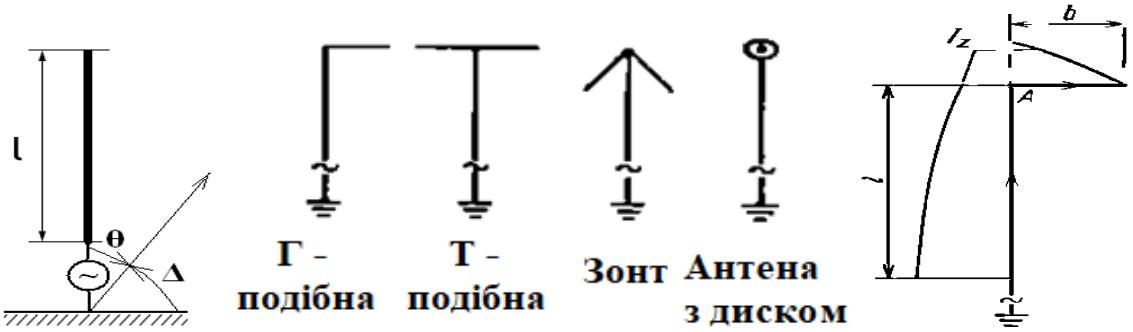


Рис. 1.12 Вертикальні несиметричні вібраторні антени

Несиметричні вертикальні заземлені вібратори застосовуються як на низьких частотах в ОНЧ - СЧ діапазонах, так і ВЧ - УВЧ діапазонах (штирові антени - автомобільні, літакові та інші). При розрахунку ДН та вхідних опорів несиметричних вібраторів ОНЧ - СЧ земну поверхню можна вважати ідеально електропровідною та замінювати її дію дією дзеркального зображення антени. Для антен ВЧ та на більш високих частотах враховуються дійсні параметри ґрунту та визначається струм у дзеркальному вібраторі за допомогою комплексних коефіцієнтів відбиття (коефіцієнтів Френзеля) [2]. У разі ідеально проводячої землі струм у ДВ (дзеркальний випромінювач) антени збігається за величиною і фазою зі струмом у вібраторі, тоді заміна землі ДВ вібратора зводиться до переходу від несиметричного вібратора довжиною l до симетричного з довжиною плеча l.

ДН несиметричного вібратора у вертикальній площині залежить від відношення l/λ_0. У горизонтальній (екваторіальній) площині вертикальний несиметричний вібратор не має спрямованих властивостей. Якщо довжина несиметричного вібратора не перевищує $0{,}7\lambda_0$, він випромінює з максимальною інтенсивністю в перпендикулярному напрямку, в горизонтальній площині. При подальшому збільшенні довжини вібратора зростають бічні пелюстки ДН та інтенсивність випромінювання вздовж землі зменшується. Чим вища електрична провідність ґрунту і чим нижча частота, тим менший кут Δ_{max} (рис. 1.13) [5]. У низькочастотних діапазонах (НЧ, СЧ) землю можна вважати практично ідеальною. Зі зростанням

частоти ґрунт починає проявляти себе як середовище з комплексною діелектричною проникністю. При цьому напрям максимального випромінювання відхиляється від поверхні землі на деякий кут Δ_{max}, що залежить від довжини хвилі та параметрів ґрунту. Це необхідно враховувати при використанні вертикальних несиметричних антен у ВЧ та більш високочастотних діапазонах.

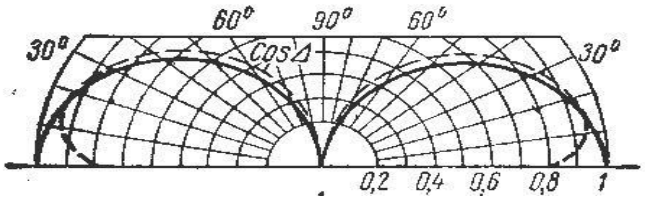
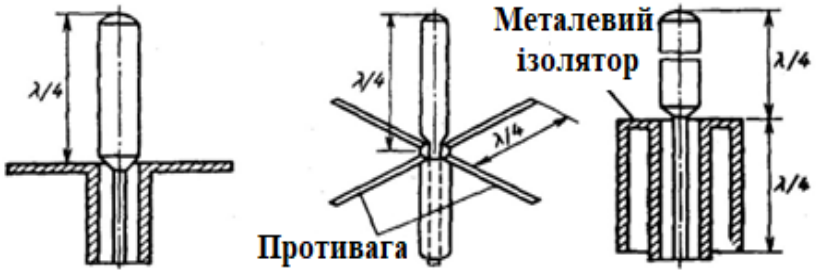


Рис. 1.13 Приклади ДН вертикального несиметричного вібратора, розташованого над площиною, що ідеально проводить (суцільна лінія) і над поверхнею з кінцевою електричною провідністю (пунктирна лінія)

Несиметричні вібратори у вигляді антен-щогл, антен-веж, Г-, Т- і П-подібних антен їх модифікацій широко використовуються як передавальні та приймальні антен у діапазонах НЧ і СЧ, особливо в системах радіомовлення. У діапазонах ВЧ-УВЧ вертикальні несиметричні вібратори особливо широко застосовуються як приймально-передавальні антени радіостанцій стаціонарних і рухомих систем радіозв'язку, радіосистем передачі сповіщень у техніці охорони, а також, наприклад, як елементи приймальних кільцевих антенних решіток систем радіомоніторингу. Варіанти конструкцій таких антен наведені на рис. 1.14.



а) б) в)

Рис. 1.14 Варіанти несиметричних вібраторних антен

У ВЧ та ОВЧ діапазонах несиметричні антени можуть мати довжину, істотно меншу за резонансну (чверть хвильову). В цьому випадку для компенсації реактивної компоненти вхідного опору використовуються реактивні елементи налаштування [9], наприклад, «подовжуючи» котушки індуктивності.

Несиметричні антени ОВЧ та УВЧ діапазонів зазвичай живляться коаксіальним кабелем (фідером). Центральний провідник кабелю підключається до чверть хвильового вібратора, а зовнішній екран до противаги або корпусу радіостанції. Вхідний опір резонансного вібратора приблизно дорівнює 36,5 Ом. Безпосереднє підключення фідера з хвильовим опором 50 або 75 Ом забезпечує КСХ відповідно 1,4 або 2,0. При необхідності одержати менший КСХ між фідером і вібратором включають узгоджувальний пристрій, наприклад, чверть хвильовий трансформатор з опором 40-50 Ом.

Великими діапазонними властивостями f_{max} /f_{min} = 4-5 при КСХ<2 має диско конусна антена з лінійною поляризацією (рис. 1.15) [9], що живиться коаксіальним кабелем з хвильовим опором 50 Ом.

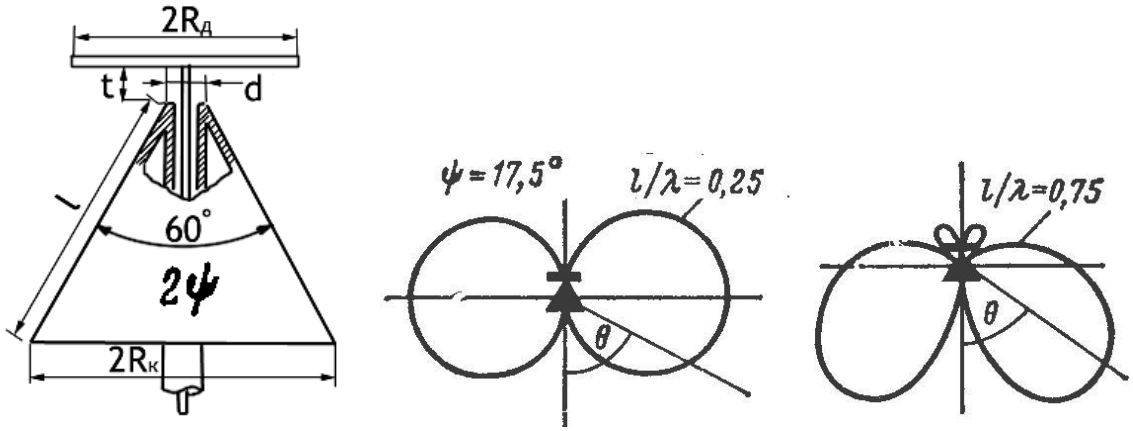


Рис. 1.15 Диско конусна антена та приклади її ДН у вертикальній (Е) площині

Розміри антени визначаються максимальною довжиною хвилі та вибираються з умов l=(0,25-0,28)λ_{max}; $2R_к$=(0,18-0,2)λ_{max}. Розміри вузла збудження повинні задовольняти співвідношенню $t \approx 0{,}3d$, де d - діаметр обплетення кабелю. Для

зменшення парусності антена ОВЧ діапазону виконується зі стрижнів або трубок, розташованих по радіусах диска і утворюють конуса. Зовнішні кінці трубок диска і конуса збільшення жорсткості приєднуються до металевих кільцях, при цьому $R_д$=0,7$R_к$. Приклади експериментальних ДН антени Е-площини наведено на рис. 1.15.

Спіральні антени виконуються у вигляді електричного провідника, згорнутого в спіраль і утворює напрямну структуру хвилі, що біжить [1, 4].

Антена складається із спірального провідника, з'єднаного з внутрішнім провідником збуджуючого коаксіального кабелю (рис. 1.16). Екрануючий обплетення кабелю приєднується до металевого диска (екрану), який перешкоджає протіканню струму по зовнішній поверхні коаксіального кабелю і є рефлектором, зменшуючи випромінювання антени в задній напів простір. Основні геометричні параметри антени: довжина спіралі l, довжина витка L, діаметр витка d, крок намотування S, кут намотування α, кількість витків n. Залежно від співвідношення розмірів антена може працювати у різних режимах з різними ДН та видами поляризації.

При діаметрі спіралі $d<\lambda_0/6$ (рис.1.16) антена працює як сукупність елементарних рамок та елементарних електричних вібраторів, що розташовані вздовж осі спіралі. Така антена має малий опір випромінювання та низький ККД, тому використовується мало. Характерна форма ДН показано на рис. 1.17, а.

При діаметрі спіралі $d>0{,}45\lambda_0$ ДН антени розщеплюється щодо осі спіралі. ДН має форму конічної вирви (рис.1.17, в).

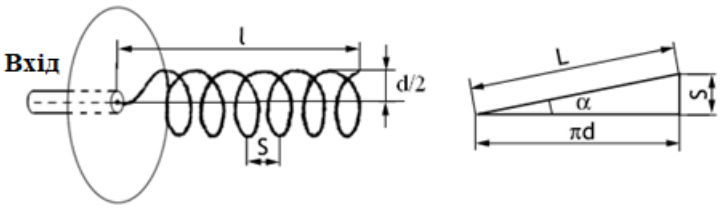


Рис. 1.16 Циліндрична спіральна антена

Найбільший практичний інтерес є антени з діаметром спіралі $d\approx(0{,}25—0{,}45)\lambda_0$, що створюють максимальне випромінювання вздовж осі у напрямку руху хвилі

струму (рис.1.17, б). В антені з довжиною витка $L \approx 0$ і при кількості витків більше трьох встановлюється режим хвилі, що біжить.

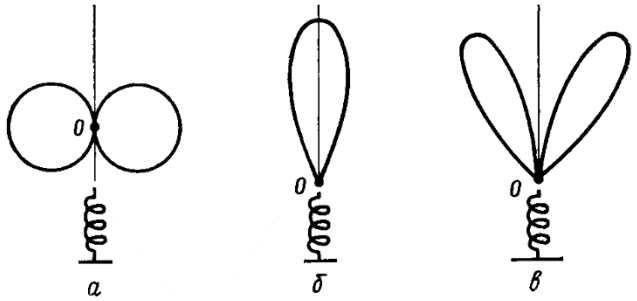


Рис. 1.17 Діаграма направленості спіральної антени

Теоретичні дослідження показують, що в нескінченній спіралі при довжині витка $L \approx \lambda_{сп}$ встановлюється режим хвилі струму, що біжить, з фазовою швидкістю $v \approx 0{,}8c$ ($c/v \approx 1{,}25$), де c — швидкість світла, і довжиною хвилі $\lambda_{сп} \approx \lambda_0 v/c$, де λ_0 — довжина хвилі у вільному просторі. При зменшенні довжини хвилі фазова швидкість підвищується, наближаючись до швидкості світла; зі збільшенням довжини хвилі — зменшується. У спіралі кінцевої довжини має місце відбиття від кінця, але воно зазвичай невелике (модуль коефіцієнта відбиття напруги не перевищує 0,2). Крім того, на початку та в кінці антени виникають вищі типи хвиль. Зазвичай у першому наближенні відбитком і найвищими типами хвиль нехтують і вважають, що амплітуда струму постійна за довжиною антени.

Спрямовані властивості антени практично зберігаються в порівняно широкому інтервалі довжин хвиль, від (0,7-0,8) λ_0 до 1,2 λ_0. При цьому забезпечується майже чиста кругова поляризація випромінювання, напрямок обертання площини поляризації збігається з напрямком намотування спіралі.

Для досягнення максимальної широкосмугової антени кут намотування вибирається рівним (12—15)°, $S = (0{,}15—0{,}3)\lambda_0$. Радіус екрана (суцільного чи ґратчастого) зазвичай вибирається не більше (0,5—0,8)l, де l — довжина спіралі.

Ширина ДН циліндричної спіральної антени по половинній потужності зазвичай не менше (20-25)°. Реальна кількість витків 4-11, при більшій кількості

витків останні практично не збуджуються і в випромінюванні не беруть участь. Для поліпшення спрямованих властивостей спіральні антени об'єднуються в решітки антен поперечного випромінювання.

1.5 Антени для засобів радіоелектронної боротьби

Антени для РЕБ — це ключові компоненти, які забезпечують прийом, передавання або глушіння радіосигналів [12]. Вони дозволяють системам РЕБ виявляти, подавляти або імітувати сигнали противника, що критично для сучасних засобів радіоелектронного впливу.

Ці антени мають задовольняти певному ряду жорстких вимог: компактність, мала вага, достатня скритність, простота та швидкість монтажу, та інше. Виконання цих вимог дозволяє встановлення антени на даху автомобіля, що в свою чергу забезпечує мобільність всього комплексу РЕБ. На рис. 1.18 показаний один з варіантів встановлення антен РЕБ на даху невеликого автомобіля.



Рис. 1.18 Розташування антен РЕБ на даху автомобіля

Основне призначення антен у системах РЕБ міститься у виконанні наступних функцій:

- глушіння радіосигналів; при цьому створюються перешкоди радіо засобам противника на визначених частотах;
- розвідка та моніторинг радіо засобів; при цьому приймаються сигнали

противника для подальшого аналізу та прийняття відповідних рішень;

- імітація сигналів: створюють фальшиві радіосигнали (наприклад, для GPS-обману), які мають дезорієнтувати противника та не дозволити виконання певних небажаних функцій.

В таблиці 1.2 наведені основні типи антен РЕБ та їх класифікація.

Таблиця 1.2

Основні типи антен РЕБ, їх класифікація за формою та функціональністю

Тип антени	Категорія	Призначення	Особливості
Квадрофілярні (QFH)	Широкосмугові	Глушіння GPS/ГНСС	Циркулярна поляризація, ідеальні для супутникових систем
Клеверні (конюшина)	Широкосмугові	Прийом/глушіння дронів	Компактні, все спрямовані, стабільна поляризація
Колінеарні	Широкосмугові	Контроль у всіх напрямках	Циркулярна поляризація, вертикальна структура
Патч антени	Направлені, середньо смугові	Мобільні або дронові РЕБ	Компактні, плоскі, точне направлення

Розглянемо докладніше сучасні типи антен РЕБ. Один з найпоширеніших типів таких антен - квадрофілярні (QFH - Quadrifilar Helix Antenna) [13]. Це все спрямовані антени з круговою поляризацією. Найчастіше використовуються для глушіння або імітації GPS/ГНСС сигналів, що важливо для створення ефективних антидрон-рішень. Підходять для широкосмугових задач.

Квадрофілярна антена — це різновид спіральної антени, яка складається з чотирьох провідників (філярів), розташованих у вигляді двох пар спіралей. Завдяки такій конструкції антена формує кругову поляризацію (RHCP або LHCP – правобічна або лівобічна), що робить її ідеальною для роботи у середовищі з великою кількістю відбитків сигналу. На рис. 1.19 показані характерні конструкції квадрофілярних антен.

Принцип роботи антени полягає в тому, що дві пари провідників утворюють спіралі з чверть хвильовим і пів хвильовим зсувом фаз. У результаті формується кругова поляризація сигналу.

Антена має майже сферичну діаграму спрямованості, тобто приймає або передає сигнал з усіх боків, особливо з верхньої півсфери.



Рис. 1.19 Типові конструкції квадрофілярних антен

Переваги квадрофілярної антени:

- кругова поляризація, що забезпечує стійкість до багатопроменевого відбиття;
- широкий кут прийому/передачі, що є ідеальним для супутникових сигналів (NOAA, METEOR, GPS);
- сумісність з FPV та БПЛА – може використовуватись як приймальна антена для стабільного зв’язку;
- простота виготовлення, що є дуже зручним для експериментального виготовлення з мідного дроту та коаксіального кабелю.

Є також певні недоліки:

- великий розмір порівняно з компактними FPV-антенами (наприклад, “клевер” або “пагода”);
- обмежений коефіцієнт підсилення (близько 2–3 dBi).

Ці недоліки обмежують застосування антени в основному для здебільшого для прийому, ніж для передачі. Квадрофілярна антена застосовується в наступних додатках:

- супутниковий зв’язок (прийом метеосупутників NOAA (137 МГц) та METEOR-M, GPS-навігація, супутникове радіо);
- FPV та БПЛА (як приймальна антена для зменшення втрат сигналу; для

стабільного прийому при польотах у міських умовах, де є багато відбитків);

- радіоаматорські проекти.

Антена типу «конюшина» (cloverleaf – лист конюшини) — це кругова антена, яка складається з трьох або чотирьох вигнутих пелюсток і використовується для забезпечення стабільного радіозв'язку, особливо на мобільних об’єктах, таких як FPV-дрони [14]. Вона характеризується круговою поляризацією, що дозволяє приймати та передавати сигнал незалежно від орієнтації пристрою та допомагає зменшити втрати сигналу. це легкі та надійні антени, які забезпечують циркулярну поляризацію. Вони ідеальні для глушіння БПЛА або радіозв’язку в умовах, коли положення передавача змінюється. На рис. 1.20 наведена конструкція чотирипелюсткової антени типу «конюшина».



Рис. 1.20 Конструкція чотирипелюсткової антени типу «конюшина»

Основні особливості цієї антени:

- кругова поляризація, що забезпечує стабільність зв'язку в динамічних умовах, оскільки сигнал ефективно приймається незалежно від положення антени;

- все направленість, що забезпечується специфічною конструкцією антени, тому вона має широкий діапазон покриття; це робить її зручною для мобільних систем, таких як дрони та радіостанції.

Конструкція антени може мати різну форму, зокрема «конюшина» або «гриб»; вона може мати як праву (RHCP), так і ліву (LHCP) кругову поляризацію. Така конструкція дозволяє використовувати при виготовленні антени мідний дріт, а для

захисту та міцності використовувати пластик, термоусадочні та діелектричні матеріали.

Антена широко використовується в FPV-системах для керування дронами, а також в радіоелектронній боротьбі, Wi-Fi та інших системах бездротового зв'язку.

Колінеарні клеверні антени — це гібридна система, що поєднує принципи **колінеарних** та **клеверних антен. Колінеарні антени - це** надзвичайно ефективні вертикальні антени з кількох елементів, розташованих по одній осі. Вони створюють сильне горизонтальне випромінювання, що дозволяє глушити сигнали навколо себе по колу — ідеально для захисту периметру. Часто використовуються у стаціонарних або авто-РЕБ системах. **Клеверні антени** мають три або чотири пелюстки, що розташовані під кутом для забезпечення все спрямованого або квазі-все спрямованого покриття.

Така конструкція антени (колінеарна клеверна) забезпечує потужне горизонтальне випромінювання в певному напрямку, зберігаючи при цьому відносно широке покриття у горизонтальній площині. Вони часто використовуються в системах радіоелектронної боротьби (РЕБ) для створення екранування від безпілотників та небажаного радіозв'язку. Такі антени часто використовуються в мобільних РЕБ-комплексах для моніторингу ефіру або широко фронтального глушіння.

Патч антени – це плоскі, спрямовані антени з фіксованим або регульованим кутом випромінювання [14]. Патч-антена (від англ. patch — латка, часто використовується термін смугова антена) — тип слабо направленої антени діапазонів УВЧ і НВЧ. Патч-антена складається з тонкої плоскої металевої пластини ("п’ятачка"), розташованої на малої (0,01…0,1λ) відстані паралельно плоскому металевому екрану. Зазор між п’ятачком і екраном може бути заповнений шаром діелектрика ($\varepsilon = 2{,}5\ldots10$, $\mathrm{tg}\delta = 10^{-3}\ldots10^{-2}$), а сама антена виготовляється за технологією друкованих плат (мікро смугова або друкована патч-антена). Як правило, п'ятачок має прямокутну форму, при чому відстань між випромінюючими сторонами

прямокутника (т. е. довжина невипромінюючих сторін) близька до половини робочої довжини хвилі (з урахуванням ε). На рис. 1.21 наведена конструкція патч-антен.

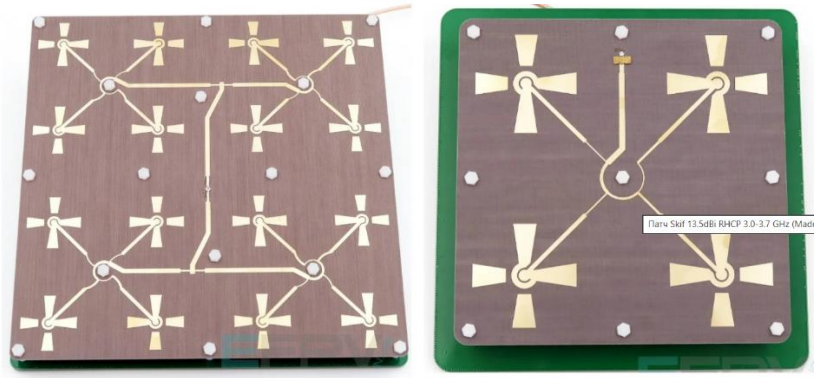


Рис. 1.21 Приклад конструкції патч-антен

Патч-антени широко застосовуються на дронах, роботизованих платформах та компактних РЕБ-рішеннях. Можуть комбінуватись у масиви для створення фазованої решітки.

При виборі антени для РЕБ необхідно керуватися певними критеріями:

- ціль використання: глушіння, перехоплення, обман противника;
- частотний діапазон: GPS, Wi-Fi, LTE, UHF, інше;
- тип поляризації: лінійна чи циркулярна;
- спрямованість: вузько спрямована, секторна, все спрямована;
- форм-фактор: стаціонарна, тактична, дронова.

Успішна реалізація РЕБ-рішення неможлива без правильно підібраної антени. Квадрофілярні, клеверні, патч-антени — кожна має свої переваги у конкретних умовах. Знання їх характеристик дозволяє максимізувати ефективність глушіння, точність розвідки та безпеку операцій.

2 РОЗРОБКА АНТЕНИ ДЛЯ ЗАСОБІВ РЕБ

2.1 Антена типу «конюшина» для засобів РЕБ

Згідне завданню на виконання магістерської роботи необхідне створити антену для системи радіоелектронної боротьби, для створення завади летальним апаратам противника. Згідне завдання це має бути компактний пристрій, якій можна монтувати на даху автомобіля. Діапазон частот створення завади 150 – 450 МГц, діаграма направленості в горизонтальної площині має бути круговою, а в вертикальної площині має бути такою, щоб під кутом 60^0 до горизонту рівень потужності випромінювання був близьким до 0,8 від максимального рівня потужності випромінювання.

Попередній аналіз антенних пристроїв показує, що таки умовам задовольняють спіральні та квадрифилярної антени. Це типи антен, що використовуються для різних цілей, переважно для забезпечення кругової поляризації радіосигналів. Спіральні антени добре відомі в антенній техніці та застосовуються в космічному зв'язку, радіоастрономії та телеметрії. Квадрифилярні антени, що є різновидом спіральних, часто використовуються в системах радіоелектронної боротьби і придушення сигналів від FPV-дронів.

Спіральні антени:

Мають компактні розміри та забезпечують спрямоване одностороннє випромінювання. Вони часто використовуються в космічних додатках, таких як супутниковий зв'язок, телеметрія та радіоастрономія; можуть працювати у широкому діапазоні частот, забезпечуючи кругову поляризацію.

Існують різні типи спіральних антен, включаючи антени з кількома витками та плечима, а також антени на підкладці. Вони застосовуються для пеленгації, моніторингу спектра частот та у GPS-системах.

Квадрифилярні антени:

Це спіральні антени, спеціально розроблені для забезпечення кругової поляризації. Вони особливо ефективні в системах радіоелектронної боротьби для

придушення сигналів від дронів, завдяки своїй спрямованості і здатності працювати зі змінною орієнтацією дронів; використовуються для прийому та передачі ефірних радіосигналів із круговою поляризацією; мають ширший робочий діапазон частот проти звичайними спіральними антенами; застосовуються для захисту об'єктів критичної інфраструктури та військових підрозділів.

Розглядаючи різні варіанти антен для цифрових видів зв'язку неможливо обійти увагою антену «конюшина (клевер)». Антена особливо популярна для застосування в техніці FPV дронів, проте з'явилася і в інших автоматизованих пристроях на основі Arduino (Arduino — торгова марка апаратно-програмних засобів побудови та прототипування простих систем, моделей та експериментів в галузі електроніки, автоматики, автоматизації процесів та робототехніки).

Діаграма спрямованості «конюшини» схожа на діаграму спрямованості диполя, але на відміну від останнього, ця антена має кругову поляризацію, що має особливе значення для зв'язку з об'єктами, що рухаються. Крім того, антена може застосовуватись для GPS модулів. Антену можна застосовувати і в мережах з лінійною поляризацією, наприклад, Wi-Fi, але не рекомендується, оскільки в цьому випадку вона не має жодних переваг перед монополем або колінеарною антеною.

Антена «конюшина» має три (або більше) рамки, підключені паралельно і вигнуті певним чином для отримання кругової поляризації. Найбільш популярні 3-х і 4-х пелюсткові антени «конюшина». Схематичне зображення антени представлене на рис. 2.1.

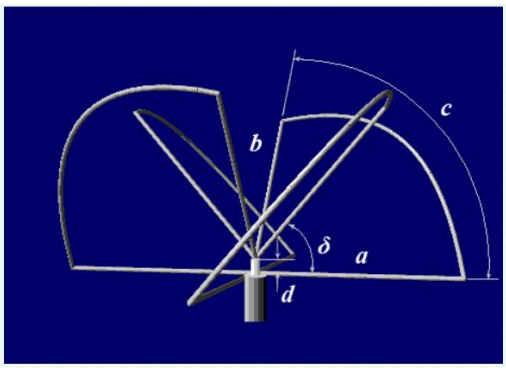


Рис. 2.1 Схематичне зображення антени «конюшина»

Обмеження та особливості розрахунку.

Вхідний опір як 3-х пелюсткової, так і 4-х пелюсткової антени близько 50 Ом. Як і будь-яка рамкова антена з диференціальним входом, антена «конюшина» потребує схеми симетрування (або відсікання струму). Однак при використанні в апаратурі FPV з невеликими пігтейлами цією вимогою зазвичай нехтують. У результаті випромінювання пігтейлу та інших металевих елементів устаткування складається з випромінюванням «конюшини». При цьому спотворюється діаграма спрямованості антени та її поляризаційні характеристики. Але оскільки пігтейл маленький, ці спотворення можна вважати несуттєвими.

На рис. 2.2 показано поширення електромагнітної хвилі з правосторонньою круговою поляризацією RHCP.

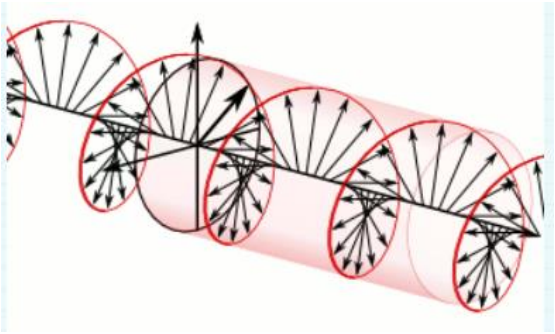


Рис. 2.2 Розповсюдження електромагнітної хвилі з правосторонньою круговою поляризацією

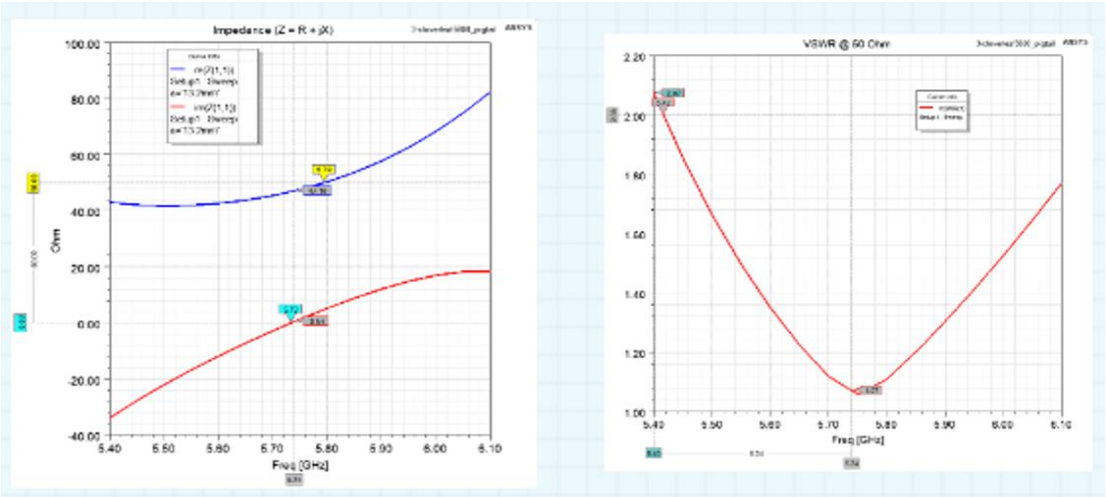
При цьому в загальному випадку на площині, що є перпендикулярною до вектору поширення, кінець вектору електричного поля з плином часу описує еліпс. Така поляризація називається еліптичною і її можна розглядати як кругову з добавкою деякої лінійної компоненти.

Відношення великої осі такого еліпса до малої називається осьовим поляризаційним відношенням - Polarization Axial Ratio (AR). Воно змінюється від одиниці до нескінченності, при одиниці маємо справу з ідеально круговою поляризацією, при нескінченності - з чисто лінійною.

Будь-яка реальна антена (у тому числі і «конюшина») випромінює хвилю з тим чи іншим ступенем еліптичності. Якщо припустити, що значення AR трохи більше 2-3 дБ, тоді можна вважати, що хвиля має кругову поляризацію. Конюшина не дотягує до цього порога, тобто випромінює хвилю з явно еліптичною поляризацією. Але цього виявляється достатньо для безперервного зв'язку з об'єктом, що рухається, або достатньо для повноцінного придушення роботи ворожого летального пристрою.

Для того щоб дізнатися в який бік обертається поляризація конюшини необхідно застосувати правило правої або лівої руки: стиснути пігтейл у правій руці так, щоб великий палець показував вгору, якщо пелюстки клеверу від низу до верху закручуються так як пальці правої руки, то антена має RHCP (Right Hand Circular). В іншому випадку необхідно зробити все те саме з лівою рукою і переконатися, що поляризація LHCP (Left Hand Circular polarization). На схематичних зображеннях показані RHCP «конюшини». На приймальній та передавальній стороні повинні стояти антени однакової поляризації.

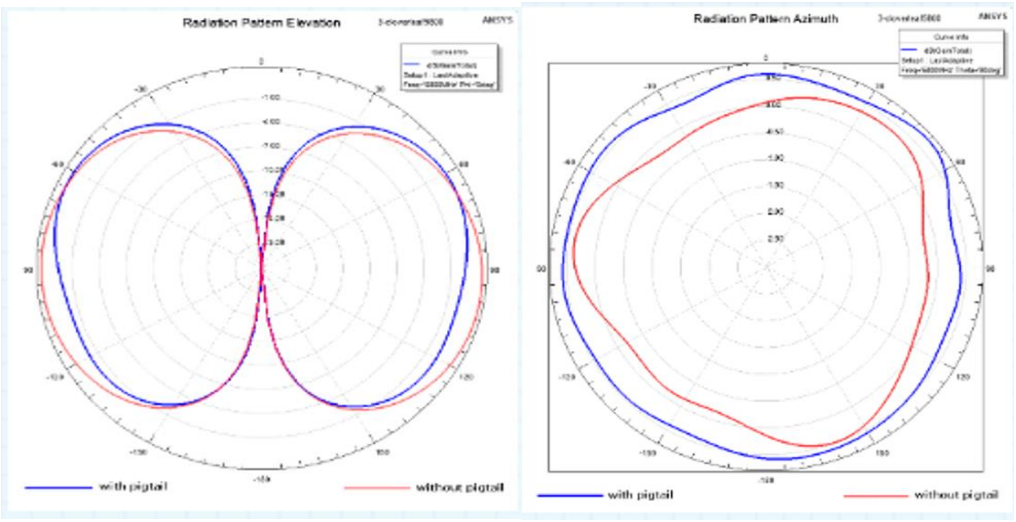
Основні характеристики антени, розраховані у програмі HFSS (High Frequency Structural Simulator), показано на рис. 2.3, 2.4 [14].



а) б)

Рис. 2.3 Електричні характеристики трипелюсткової антени «конюшина»

а) вхідний імпеданс; б) коефіцієнт стоячої хвилі



а) б)

Рис. 2.4 Характеристики направленості трипелюсткової антени «конюшина»

а) вертикальна площина; б) горизонтальна площина

Відсутність схеми симетрування призводить до того, що випромінює як сам пігтейл, так й усе що до нього підключено. Тому характеристики антени нестабільні і змінюватимуться залежно від довжини пігтейлу та від типу обладнання. Або іншими словами на різних коптерах одна й та сама антена може поводити себе по-різному. Навіть у чітко налаштованої на аналізаторі антени при підключенні до робочої конструкції характеристики можуть дещо змінитися. Положення рятує те, що смуга пропускання антени досить широка, проте перебір різних екземплярів допоможе знайти найкращий варіант. При налаштуванні корисно регулювати довжину пігтейлу.

Антена досить широкосмугова і тому має непогану повторюваність. При виготовленні слід звернути увагу не тільки на точність виготовлення пелюсток, але і величину зазору в місці підключення *d* (рис. 2.1).

Розміри конструкції антени розраховані на онлайн калькуляторі антени «конюшина» [14]. Калькулятор заснований на моделях для програми HFSS і 4NEC2 (NEC базується на antenna modeler and optimizer). Розрахунок зроблений для декількох частот діапазону.

Результати розрахунку для частоти 150 МГц

Кількість пелюсток антени: 3; довжина хвилі λ: 1 м 999 мм.

Конструктивні характеристики

Розміри: a: 505 мм; b: 428 мм; з: 952 мм.

Діаметр дроту dw: 13 мм (AWG#).

Розмір *d* (у місці підключення): 84.4 мм.

Загальна довжина дроту однієї пелюстки: 1 м 886 мм.

Розкрив пелюстки (кут між сторонами a і b): 108°.

Кут нахилу пелюстки до горизонту δ: 55°.

Результати розрахунку для частоти 450 МГц

Кількість пелюсток антени: 3; довжина хвилі λ: 666 мм.

Конструктивні характеристики

Розміри: a: 168 мм; b: 143 мм; з: 317 мм.

Діаметр дроту dw: 4.3 мм (6 AWG#).

Розмір *d* (у місці підключення): 28.1 мм.

Загальна довжина дроту однієї пелюстки: 629 мм.

Розкрив пелюстки (кут між сторонами a і b): 108°.

Кут нахилу пелюстки до горизонту δ: 55°.

Таблиця 2.1

Результат розрахунку антени «конюшина» для частот 225 та 375 МГц

Кількість пелюсток антени: 3	Кількість пелюсток антени: 3
Частота f: **375** МГц	Частота f: **225** МГц
Довжина хвилі λ: 799 мм	Довжина хвилі λ: 1 м 332 мм
Розміри: a - 202 мм; b - 171 мм; c - 381 мм.	Розміри: a - 337 мм; b - 286 мм; c - 635 мм
Діаметр проводу dw: 5.2 мм (4 AWG#)	Діаметр проводу dw: 8.7 мм (00 AWG#)
Розмір d (в місці підключення): 33.8 мм	Розмір d (в місці підключення): 56.3 мм
Загальна довжина проводу пелюстки: 754 мм	Загальна довжина проводу пелюстки: 1м257мм
Розкрив пелюстки (кут між **a** та **b**): 108°	Розкрив пелюстки (кут між **a** та **b**): 108°
Кут нахилу пелюстки до горизонту δ: 55°.	Кут нахилу пелюстки до горизонту δ: 55°

2.2 Розробка та технологія виготовлення антени «конюшина»

Виготовлення антени «конюшина» представлене для частоти 375 МГц. Для інших частот виготовлення антени виконується таким же чином, як і для частоти 375 МГц.

1. Необхідні матеріали

Провід для виготовлення пелюсток. Підходить провід марки AWG6 (рис. 2.5 а, American Wire Gauge — американський калібр проводів), діаметр 5,2 мм.

Кабель коаксіальний фідерний (Рис. 2.5 б) - **к**оаксіальний фідерний кабель HCAAYZ-50-12 (1/2") [16].



а) б)

Рис. 2.5 Зовнішній вигляд проводу та кабелю для створення антени
а) провід AWG6, б) кабель коаксіальний HCAAYZ-50-12 (1/2")

Технологічна дерев'яна пластина (дошка приблизно 500х500 мм товщиною 15-20 мм) з отвором під кабель. Вона необхідна для придання жорсткості при монтажу та пайці.

Шаблон для правильного встановлення кута нахилу пелюсток рис. 2.6.

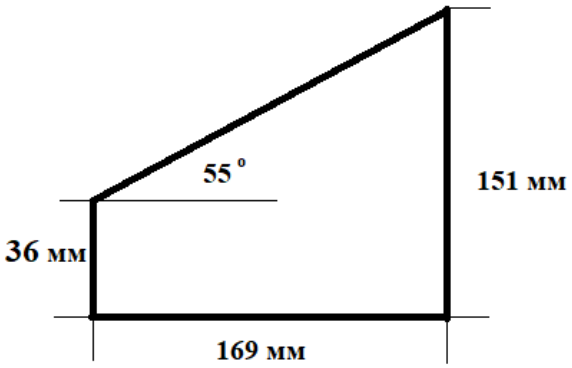
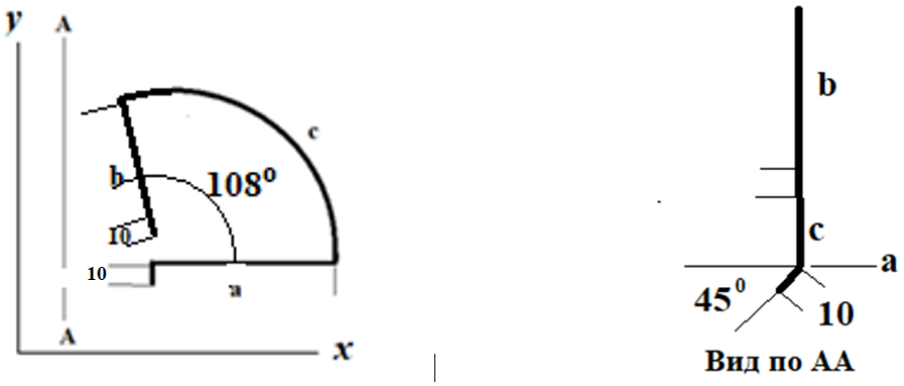


Рис. 2.6 Шаблон для встановлення кута нахилу пелюстка антени

2. Виготовлення пелюсток

Відрізати провід довжиною 774 мм (на 20 мм більш; 2х10 мм для пайки). Провести розмітку та зігнути так, як вказане на рис. 2.7. Дуга **c** має бути дугою окружності, відрізок 10 мм на стороні **b** згинається пізніше при пайці проводів.

Таким чином потрібне зробити три заготовки пелюсток клеверу.



а) б)

Рис. 2.7 Заготовка пелюстки клеверу

а) вид в площині ***X0Y***, б) вид в площині перпендикулярної до ***X0Y***

3. Пайка нижніх гілок пелюстки до зовнішнього провідника кабелю (трубки)

На технологічної дошці необхідне зробити розмітку для вірного монтажу пелюсток. Розмітка показана на рис. 2.8. Жирні лінії – це розташування нижніх гілок пелюстки, вони мають знаходитися під кутом 120°. Тонкі лінії – це розташування верхніх гілок пелюсток, вони мають знаходитися під кутом 108° по відношенню до нижніх.

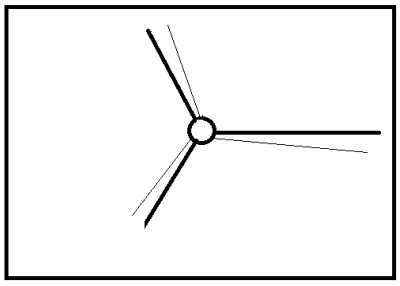


Рис. 2.8 Розмітка розташування віток пелюстки на технологічної дошці

Потрібне оголити центральний провідник кабелю (рис. 2.9) на довжину **d**, тобто зняти зовнішній провідник (трубку), але ізоляцію центрального провідника зняти тільки з самого кінця на довжину 10 мм. Також треба зняти ізоляцію з зовнішнього провідника (трубки) на 10 мм.

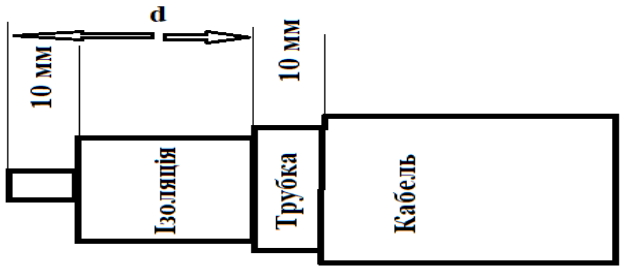


Рис. 2.9 Підготовка кабелю для пайки

Кабель встановлюється в отвір на технологічної дошці таким чином, щоб його кінець виступав над поверхнею дошки на 10 мм. Нижні гілки пелюсток розташовуються по жирним лініям розмітки та припаюються до зовнішнього провідника кабелю (трубки) відігнутою частинкою (рис. 2.7,а). Після пайки потрібне перевірити кути (120^{o}) між нижніми гілками пелюсток, підігнути, якщо потрібне та перевірити кути (108^{o}), під якими будуть знаходитися верхні гілки пелюсток; підправити, якщо потрібне.

4. Припаювання верхніх гілок пелюсток до центрального провідника кабелю

Перед припаюванням верхніх гілок пелюсток треба встановити необхідний кут нахилу верхньої гілки пелюстки до горизонтальної площини користуючись шаблоном (рис. 2.6). При цьому шаблон встановлюється на вузьку лінію розмітки на технологічної дошці, а на нього покладається верхня гілка пелюстки (рис. 2.10). Далі підігнути відрізки для пайки (10 мм) верхніх гілок так, щоб вони були паралельні до центрального провідника кабелю. Після цього верхні гілки пелюсток припаюються до центрального провідника кабелю відігнутим відрізком (10 мм). Далі необхідне проконтролювати кути нахилу верхніх гілок шаблоном та коректувати, якщо потрібне.

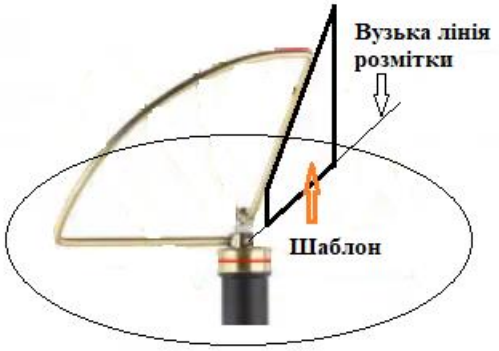


Рис. 2.10 Встановлення кута нахилу пелюстки за допомогою шаблону

Після пайки необхідне провести герметизацію паяльних з’єднань. Місця пайки повинні мати приблизно такий вигляд, як показане на рис. 2.11.

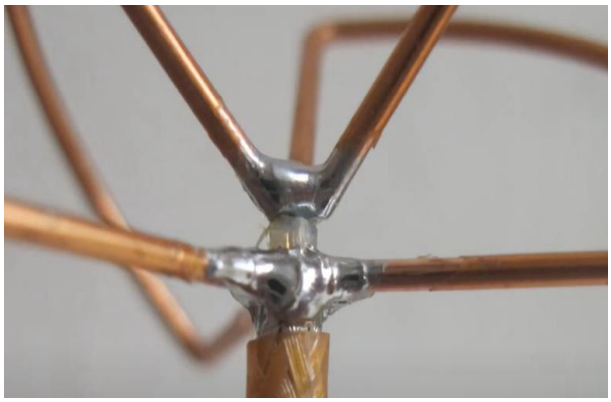


Рис. 2.11 Вигляд місць пайки антени

На рис. 2.12 показаний зовнішній вигляд деяких антен типу «конюшина».



Рис. 2.12 Зовнішній вигляд антен типу «клевер» для різних діапазонів частот

5. Підключення антени до передавача

Підключення антени слід зробити за допомогою роз'єму типу N (хвилевий опір 50 Ом) (рис. 2.1) [17].



Рис. 2.13 Зовнішній вигляд роз'єму типу N коаксіального кабелю

Цей роз'єм встановлюється на кабель з протилежного до антени боку та слугує для підключення до передавача. На передавачі має бути встановлений відповідний роз'єм. Зовнішній контакт цього роз'єму має бути з'єднаним з шасі (корпусом) передавача, а на корпусі передавача має бути спеціальна клема для зовнішнього заземлення. Все це має бути виконане згідно діючому стандарту України з електричної безпеки. При використанні обладнання в польових умовах клема заземлення передавача має бути з'єднана з заземленням достатньо товстим проводом згідно стандарту України про захист обладнання від дії блискавки [18].

6. Характеристики антени, які очікуються

Діаграма спрямованості повинна мати наступний вигляд (рис. 2.14).

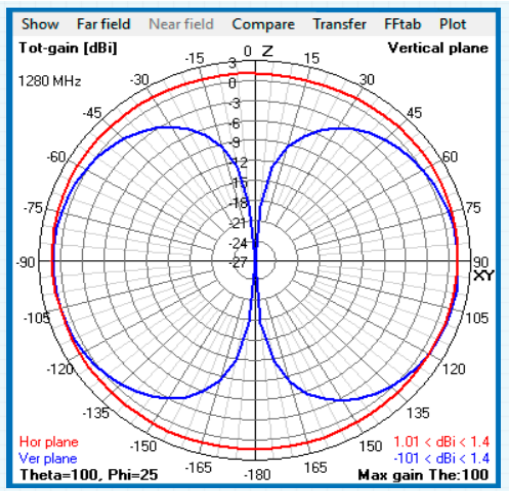


Рис. 2.14 Діаграма спрямованості антени в вертикальної площині

Поляризація випромінювання еліптична, але близька до кругової. Площина поляризації випромінювання обертається в лівий бік.

КСХ антени на центральної частоті складає приблизне 1,1, а на межах діапазону приблизно 2. З рисунку 2.3,б можна розрахувати ширину смуги частот антени, вона складає приблизно 10-12%, тобто для покриття всього діапазону частот, що заданий (150 – 450 МГц), необхідно мати 5 антен такого типу.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ АНТЕННИХ ПРИСТРОЇВ

3.1 Задачі, принципи та структура моделювання антенних пристроїв

Проектування антени для сучасних РТС є досить складним інженерним завданням. Навіть для типової антени потрібно вирішувати питання визначення струмів (збуджуючих полів) в антені для формування ДН із заданими параметрами. У ряді випадків відсутність типових варіантів антен змушує розробників знаходити нові технічні рішення. Побудова оптимального варіанта антени за заданими технічними та економічними вимогами є тривалим і трудомістким процесом, що вимагає виконання значних обчислень, виготовлення дослідних зразків та експериментальних досліджень.

Зараз розроблено інженерні методики розрахунку багатьох антен, засновані на ряді спрощень та наближень, вони застосовуються на етапі попереднього проектування антен. Отримані результати є основою подальшого використання систем автоматизованого проектування (САПР) чи програм комп'ютерного моделювання, створених з урахуванням числових математичних методів електродинаміки. Використання САПР та спеціалізованих програм скорочує витрати та терміни проектування, особливо складних систем, таких як, наприклад, ФАР.

Автоматизоване проектування антен та фідерних пристроїв передбачає такі основні етапи [4, 8, 9]:

1 - постановка задачі;

2 - структурний синтез конструкції;

3 - математичне моделювання та аналіз електричних характеристик;

4 - параметрична оптимізація конструкції;

5 - конструювання.

Проектування полягає в послідовному наближенні до оптимального рішення за заданими критеріями. Особливість автоматизованого проектування полягає у

комплексному вирішенні завдань розробки структури та конструкції, а також питань технології виробництва антени.

При постановці завдання вирішуються такі питання:

- аналіз технічного завдання (ТЗ) з позицій виконання його вимог;

- розробка пропозицій щодо реалізації вимог ТЗ;

- вибір критеріїв оцінки якості проектованої антени.

На етапі структурного синтезу визначається оптимальна за обраними критеріями конструкція антени. Успішне вирішення цього завдання залежить від наявності інформації про відомі конструкції та від практичного досвіду розробників.

На етапі математичного моделювання визначаються властивості антени при обраної конструкції шляхом побудови її математичної моделі та розрахунку необхідних електричних характеристик. На цьому етапі аналізується чутливість характеристик антени до зміни параметрів її конструкції та оцінюється адекватність моделі.

На етапі параметричної оптимізації фізичні уявлення про якість роботи антени перетворюються на математичне формулювання екстремального завдання - визначається мета оптимізації та формалізується поняття оптимальності. На цьому етапі використовуються критерії оптимальності - правила переваги варіантів, що порівнюються. Основу критерію оптимальності становить цільова функція. Аргументами цільової функції є параметри математичної моделі. Потім виконується оптимізація цільової функції в межах безлічі значень параметрів, що варіюються.

На етапі конструювання за отриманими в результаті параметричної оптимізації електродинамічними та конструктивними параметрами уточняється остаточний варіант конструкції антени.

При проектуванні може бути так, що вихідна конструкція антени не задовольняє деяким вимогам ТЗ. У цьому випадку необхідно вносити зміни до конструкції, вибирати іншу або створювати нову.

3.2 Розвиток методів моделювання

Перші САПР антен та пристроїв НВЧ, створені в 80-х роках минулого століття відрізнялися простотою математичного забезпечення. Подальший розвиток САПР антенно-фідерних пристроїв було пов'язано зі створенням графічного інтерфейсу користувача та переходом до електродинамічного аналізу пристроїв.

Відома САПР Microwave Office [19] фірми Applied Wave Research використовує електродинамічний аналіз пристрою, що представляється у вигляді набору базових елементів. Система Microwave Office містить практично повний набір опцій, що використовуються в САПР низькочастотних пристроїв для нелінійного аналізу схеми, оптимізації, аналізу чутливості, статистичного аналізу.

Інша популярна система Advanced Design System (ADS) [20] містить блок електродинамічного аналізу ADS Momentum. Системи Microwave Office і ADS є повною мірою системами тривимірного електродинамічного моделювання, оскільки вони орієнтовані на аналіз багатошарових друкованих схем.

Максимальну універсальність з точки зору вирішення тривимірних завдань електродинаміки мають системи: High Frequency System Simulator (HFSS) [21], CST Microwave Studio (MWS) [22], FEKO [23]. Ці програмні продукти можна використовувати з операційною системою Windows.

У сучасних САПР реалізуються чисельні математичні методи технічної електродинаміки. Найважливішими з них є прямі методи вирішення граничних завдань: FEM — метод кінцевих елементів (МКІ) та Finite Difference Time Domain (FDTD) — метод кінцевих різниць у часовій області. Ці методи універсальні і дозволяють аналізувати практично будь-яку структуру, але для систем, які за розмірами значно більші за довжину хвилі, вирішення завдань потребує значного машинного часу та пам'яті. Це пов'язано з дискретизацією простору, що лежить в основі методів. Кількість елементів розбиття аналізованої структури визначає розмірність задачі, що розв'язується; у випадку FEM і FDTD воно виявляється максимально можливим із усіх відомих методів.

Альтернативним напрямом у вирішенні задач електродинаміки є непрямі методи, наприклад метод моментів (МОМ). Його відмінність від FEM і FDTD полягає в тому, що чисельне визначення ЕМП ґрунтується на аналітичному вирішенні деякої ключової задачі, а саме задачі про збудження структури елементарним джерелом струму з використанням функції Гріна. МОМ виявляється ефективним, якщо функція Гріна може бути записана аналітично у простій формі. В цьому випадку дискретизується не простір, лише поверхня. Це знижує розмірність завдання, проте функція Гріна може бути знайдена лише для обмеженої кількості структур, зокрема, плоско шарових.

Особливе місце серед завдань, розв'язуваних САПР АФП, займають завдання випромінювання та розсіювання електромагнітних хвиль. Тут суворі методи електродинаміки доповнюються асимптотичними методами: фізичної оптики (ФО), геометричної теорії дифракції (ГТД) та іншими. Гібридні підходи, що використовують ФО та ГТД, реалізовані у програмі FEKO.

Поява систем електродинамічного моделювання та автоматизованого проектування змінила вимоги до рівня підготовки користувача САПР. Може здатися, що вимоги знизилися, оскільки користувач - розробник антенно-фідерних пристроїв не повинен знати деталі розв'язання електродинамічного завдання. Однак сучасні САПР НВЧ є найскладнішими системами, ефективність функціонування яких суттєво залежить від безлічі налаштувань та параметрів, які встановлюють користувач. Налаштування залежать від вимог до якості розв'язання задач, які також визначає користувач. Тому користувач повинен мати уявлення про основи технічної електродинаміки та теорії антен.

3.3 Приклади програмних засобів та їх застосування

Однією з комп'ютерних програм, що широко використовуються для аналізу та розробки пристроїв НВЧ та антен, є програма Ansys HFSS [21]. Вона розроблена для

аналізу тривимірних НВЧ структур, включаючи антени та невзаємні пристрої з феритовими елементами.

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

Процес проектування за допомогою HFSS включає наступне:

1. Створення моделі, зокрема побудова тривимірної графічної моделі структури (креслення) і завдання параметрів матеріалів, з яких вона складається.

2. Визначення електродинамічних параметрів структури, що включає завдання граничних умов на поверхнях, що формують об'єкт, який аналізується; визначення та калібрування портів; завдання параметрів рішення.

3. Електродинамічний аналіз об'єкта, що досліджується, в тому числі розрахунок електричних характеристик об'єкта в смузі частот, параметричний аналіз та оптимізація об'єкта.

4. Візуалізація результатів аналізу, що включає побудову графіків у Декартових, полярних чи сферичних координатах, діаграм Сміта, діаграм спрямованості та інше; анімацію розподілів електромагнітного поля та електричного струму; збереження результатів аналізу у файлах даних.

HFSS включає підпрограми, що реалізують різні функції. До них входить підпрограма вирішення граничних завдань електродинаміки, яка називається вирішальним пристроєм. Ця підпрограма забезпечує отримання достовірних та точних результатів.

Постпроцесор HFSS — спеціальна програма, що забезпечує анімацію та візуалізацію компонентів електромагнітного поля, а також обробку статичних та

анімаційних креслень на будь-якій поверхні.

Візуалізація поля та тривимірної діаграми спрямованості, що використовує м'які переходи кольорів, дозволяє вивчити ближні поля і поля випромінювання з високою точністю. Користувачі можуть повертати структуру в реальному масштабі часу з миттєвими модифікаціями графіків. Постпроцесор також виконує обробку розрахункових даних та пов'язаних із ними характеристик.

Калькулятор поля - підпрограма, призначена для обробки результатів вирішення граничного завдання у вигляді розподілу векторів електричного та магнітного полів. Калькулятор може обчислити похідні від векторів поля та їх компонент, перетворити та записати отримані дані у файл та багато іншого.

HFSS має потужну макро командну мову з можливістю автоматичного запису та модифікації. Ці можливості реалізовані в програмі Optimetrics, яка виконує параметричний аналіз та оптимізацію структури, змінюючи форму та розміри елементів, що входять до неї.

Як цільова функція під час оптимізації можуть використовуватися S-параметри та інші характеристики, включаючи діаграму спрямованості та параметри антени.

HFSS дозволяє врахувати вплив корпусу об’єкту на характеристики антени. Використовуючи оптимізацію за допомогою утиліти Optimetrics, розробник може мінімізувати цей вплив та оптимізувати структуру за критерієм максимуму коефіцієнта підсилення та мінімуму крос-поляризаційного випромінювання.

Великою популярністю у розробників антенно-фідерних пристроїв користується система моделювання тривимірних НВЧ структур CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) [22]. Вона є програмою, призначеною для швидкого числового моделювання високочастотних пристроїв (антен, фільтрів, відгалужувачів потужності, планарних та багатошарових структур), аналізу проблем цілісності сигналів та електромагнітної сумісності у часовій та частотних областях з використанням прямокутної або тетраедральної сіток розбиття.

Головною перевагою обчислювальних технологій компанії CST є використання

апроксимації для ідеальних граничних умов (Perfect Boundary Approximation, PBA). При моделюванні тривимірних (3D) структур, що містять поверхні складної кривизни, використання класичної прямокутної сітки розбиття призводить до необхідності використовувати дрібну сітку та велику кількість чарунок. Використання тетраедральної сітки частково вирішує проблему та дозволяє знизити вимоги до обчислювальних ресурсів. Технологія PBA використовує переваги обох підходів та забезпечує високу продуктивність без втрати точності обчислень.

За допомогою пакета CST MWS, як і ANSYS HFSS, можна з високою точністю досліджувати практично будь-які пристрої НВЧ та антени.

Пакет CST MWS –програмний продукт, що має у складі всі необхідні модулі від графічного редактора для малювання тривимірної структури до модуля побудови розрахованих частотних залежностей. Система побудови досліджуваних структур базується на ядрі ACIS, що використовується більшістю відомих систем CAD, наприклад, відомою програмою AutoCAD. За допомогою цієї технології малювання складних конструкцій об'ємних НВЧ пристроїв проводиться легко та швидко. Пакет передбачає можливість логічного складання компонентів структури, причому окремі частини таких компонентів можуть бути збудовані з різних матеріалів. Зміна параметрів матеріалів може виконуватися як окремо вручну, так і глобальною заміною бази даних матеріалів. Реалізовано виділення кількох об'єктів безпосередньо в полі побудови тривимірної структури, а також на дереві проекту на панелі навігації, після чого можлива одночасна зміна параметрів або геометричних розмірів.

Особливу увагу розробники CST MWS приділили інтеграції до існуючого потоку проектування та забезпечили зв'язки з іншими EDA та CAD пакетами. У новій версії перероблено модулі імпорту та експорту популярних 3D форматів STEP, SAT, IGES та STL, а також двовимірного формату DXF. Реалізовано імпорт двовимірних форматів GDSII, Gerber та Sonnet EM, а також об'ємного опису людського тіла.

Програма CST MWS використовує метод кінцевих інтегралів (FIT) - підхід, який описує рівняння Максвелла на просторовій сітці з урахуванням закону збереження

енергії, а потім формує систему диференціальних рівнянь, наприклад, хвильових. Метод може бути реалізований як у часовій, так і частотній області. Крім того, не накладаються обмеження на тип використовуваної сітки розбиття структури об'єкта. Поряд із структурованою сіткою в Декартовій системі координат підтримуються неортогональні сітки, наприклад, тетраедральна. Таким чином, пакет CST MWS дозволяє вибирати оптимальні для цієї задачі метод розв'язання та спосіб розбиття.

Підпрограма обчислень у часовій області (Time Domain Solver) дозволяє розрахувати характеристики пристроїв НВЧ та антен у широкому діапазоні частот з високою роздільною здатністю по частоті, в результаті чого знижується ймовірність пропуску, наприклад, гострих резонансних піків у частотних характеристиках модуля коефіцієнта відбиття за напругою або КСВ. Підпрограма обчислень в частотній області (Frequency Domain Solver) має адаптивний алгоритм частотного свіпування, що дозволяє отримати точні характеристики при мінімальної кількості частотних точок, що автоматично вибирається. CST MWS включає періодичний обчислювач мод у граничних портах, що забезпечує високу точність широкого діапазону кутів випромінювання антен, що необхідно для розрахунку характеристик ФАР. CST MWS дозволяє використовувати механізм розподілених обчислень на кількох комп'ютерах у межах локальної мережі. Результати аналізу накопичуються в центральному комп'ютері, який автоматично формує завдання для машин, що простоюють. Використання розподілених обчислень зменшує витрати часу.

Третя широко відома програма Altair FEKO [23] призначена для вирішення широкого кола завдань, пов'язаних із проектуванням НВЧ пристроїв та антен, розсіюванням електромагнітних хвиль на складних об'єктах, поширенням радіохвиль у міських умовах тощо. Головною особливістю програми Altair FEKO, що відрізняє її від аналогічних продуктів (Microwave Office, HFSS і т.д.), є вдале поєднання чисельних методів вирішення тривимірних електродинамічних завдань (метод моментів) з наближеними аналітичними методами: фізичної оптики та однорідної теорії дифракції. Таке поєднання дозволяє подолати головний недолік програм

комп'ютерного моделювання високочастотних структур - великі витрати ресурсів при моделюванні об'єктів з розмірами багато більшими за довжину хвилі. В результаті з'являється можливість вирішення таких завдань, як розсіювання радіохвиль літаком або кораблем і поширення радіохвиль у міських умовах з високою точністю.

У радіолокації важливим завданням є знаходження поля дифракції електромагнітних хвиль на об'єкті (літаки, кораблі, автомобілі тощо) та визначення його ефективної площі розсіювання. У подібних завданнях найповніше розкриваються переваги програми Altair FEKO, що використовує наближені методи розв'язання електродинамічних завдань для об'єктів, що мають великі електричні розміри. До такого ж класу завдань відноситься і завдання про випромінювання антени мобільного телефону, що встановлена на даху автомобіля.

Пакети прикладних програм HFSS, CST MWS та Altair FEKO є ефективними засобами, в яких зосереджені всі найкращі останні досягнення у галузі створення програм комп'ютерного моделювання та САПР пристроїв НВЧ та антен.

Під час розробки антени для засобів радіоелектронної боротьби застосовувався онлайн калькулятор антен, заснований на пакеті програм HFSS. Інтерфейс цього онлайн-калькулятора представлений на рис. 3.1.

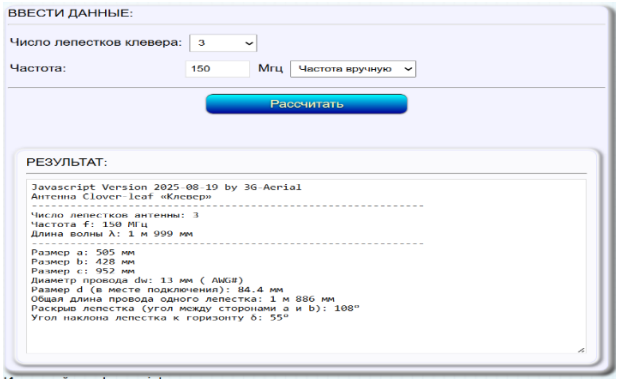


Рис. 3.1 Інтерфейс програми розрахунку антени типу конюшина

На цьому рисунку показаний результат розрахунку антени з трьома пелюстками для частоти 150 МГц. Розрахунки для інших частот, та графіки вхідного імпедансу, КСВ та діаграми спрямованості в обох площинах наведено у розділі 2.

4 ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕН

4.1 Методи вимірювання

Методи вимірювань класифікують за умовами проведення та використовуваним обладнанням:

1. Вимірювання у дальній зоні (Far-Field Measurements)

Це класичний і найпростіший метод, який полягає в розміщенні антени, що тестується (AUT), на великій відстані від вимірювальної антени.

- Умови: вимірювання проводяться на відстані, що перевищує Фраунгоферову відстань ($R \geq 2D2/\lambda$, де D — найбільший розмір антени, λ— довжина хвилі) для забезпечення плоского фронту хвилі.
- Місце проведення: часто використовуються відкриті майданчики (методи боротьби з пере відбиттями від землі є критичними) або камери без луни.
- Застосування: підходить для вимірювання діаграми спрямованості та коефіцієнта підсилення.

2. Вимірювання у ближній зоні (Near-Field Measurements) [24]

Цей метод використовує вимірювання електромагнітного поля поблизу антени, а потім за допомогою математичних перетворень (наприклад, перетворення Фур'є) обчислюються характеристики в дальньої зони.

- Типи сканування:
  - Планарне: зонд рухається по площині перед антеною (підходить для високо спрямованих антен).
  - Циліндричне: антена обертається, а зонд рухається вздовж вертикальної осі (підходить для антен з круговою діаграмою в азимуті).
  - Сферичне: антена обертається по двох осях, забезпечуючи повне 3D вимірювання (найточніший, але найскладніший).
- Переваги: дозволяє проводити вимірювання в приміщенні, не потребує великих відкритих просторів.

3. Вимірювання коефіцієнта підсилення

- Метод двох/трьох антен: стандартний спосіб, що базується на формулі передачі Фрііса; потрібно провести кілька вимірювань з різними комбінаціями антен, щоб визначити абсолютний коефіцієнт підсилення кожної.
- Метод порівняння: потужність, прийнята антеною, що тестується, порівнюється з потужністю, прийнятою еталонною антеною з відомим коефіцієнтом підсилення (наприклад, пів хвильовим диполем).

4. Вимірювання імпедансу та КСХН

Для цих вимірювань зазвичай використовують векторний аналізатор кіл (ВНК, VNA). Він вимірює вхідний імпеданс антени та коефіцієнт відбиття, на основі чого розраховується КСХН.

5. Спеціальні методи

- Радіоастрономічний метод: використовує випромінювання від позаземних радіоджерел для визначення діаграми спрямованості великих антен.
- Метод обльоту літаком/дроном: вимірювальний приймач або передавач встановлюється на літальному апаратів, який облітає антену на великій висоті.

Вибір конкретного методу залежить від вимог до точності, робочого частотного діапазону антени, її розмірів та доступного обладнання.

4.2 Вимірювання параметрів антен

У процесі розробки та виготовлення антен контролюються, в основному, три параметри: діаграма спрямованості (ДН), коефіцієнт підсилення (G) та КСХ. Причому ДН та G найбільш ретельно вимірюються на етапах розробки та виготовлення першої партії серійних виробів. Після запуску антени в серійне виробництво здійснюється 100% контроль значення КСХ, використовуючи антенний аналізатор, а ДН та G контролюється вибірково.

Антенні вимірювання специфічні тому що пред'являються жорсткі вимоги до вимірювального стенду, щодо рівня відбиття сигналів від навколишніх предметів,

стін, стелі, підлоги. Наявність відбиття спотворює справжню ДН і вносить значну похибку у вимірювання G. Для якісних вимірювань необхідно, щоб величина відбитого сигналу була ослаблена більш ніж на 30 дБ. Це може бути досягнуто тільки в спеціальних камерах без луни для проведення антенних вимірювань, де стіни підлога та стеля покриті матеріалом певної структури і конфігурації, що поглинає матеріал, або на відкритої місцевості вдалині від будинків, і конструкцій, що відбивають.

Схема вимірювання ДН і G представлена на рис. 4.1. Вибір відстані між випробуваною та допоміжною антенами визначається наступними міркуваннями: параметри ДН і G можна виміряти з достатньою мірою точності, якщо випробувана антена опромінюється плоскою хвилею, тобто хвилею, у якої поверхня рівних фаз є площиною, перпендикулярною напрямку поширення хвилі. Допоміжна передавальна антена випромінює сферичну хвилю, тому відстань між допоміжною антеною і антенами, що випробовується, повинна бути такою, щоб у межах зони з поперечними розмірами не меншими, ніж максимальний розмір антени, фронт сферичної хвилі був близький до плоскої хвилі. Для антен дециметрового діапазону відстань між антенами повинна бути не менше 10 м.

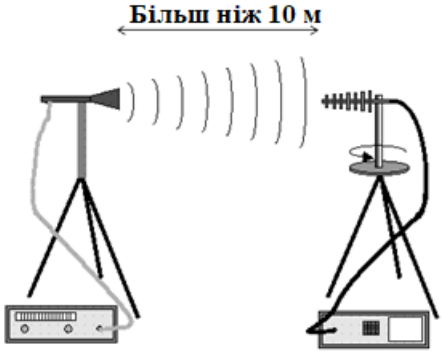


Рис. 4.1 Схема вимірювання діаграми направленості та коефіцієнту підсилення

Антена, що випробовується, встановлюється на поворотний пристрій, що дозволяє встановлювати і реєструвати кутові переміщення в кутових одиницях. Сигнал від генератора, що задає потужність, подається на вхід допоміжної антени.

Оскільки процес зняття діаграми спрямованості може займати тривалий час, необхідно підтримувати стабільним рівень сигналу на вході допоміжної антени. Як індикатор використовується вимірювальний приймач або аналізатор спектра. Повертаючи випробувану антену з кроком 5 ° ... 10 °, по індикатору фіксуються рівні сигналу на виході антени. За результатами вимірювання будується нормована діаграма спрямованості.

Коефіцієнт підсилення антени визначається порівнянням рівня сигналу на виході випробуваної антени з рівнем сигналу на виході еталонної антени з відомим коефіцієнтом підсилення і розташованої в тому ж місці, що і антена, що випробовується. Максимуми основних пелюстків діаграм спрямованості обох антен повинні бути орієнтовані у бік випромінюючої антени. Для зменшення можливих помилок, пов'язаних із відбиттям усередині камери, бажано, щоб діаграма спрямованості випробуваної та еталонної антен були близькі.

Існує інший метод визначення G – розрахунок за виміряною нормованою діаграмою спрямованості за допомогою спеціального програмного забезпечення на комп'ютері. Цей метод дозволяє оцінити достовірність проведених вимірювань ДН та G. Коректне проведені вимірювання дають розбіжності у виміряному та розрахунковому значеннях G у 5%…10%.

Добре відпрацьована та налаштована антена має КСХ менше 1,5 у всьому робочому діапазоні частот. Вимірювання КСХ зазвичай провадиться за допомогою панорамного вимірювача - антенного аналізатора, в лабораторних умовах. При проведенні вимірювань необхідно, щоб антена була розташована не ближче 5 м від предметів, що відбивають: будинків, антен.

4.3 Векторний аналізатор та інші прилади для вимірювання антен

Правильний вибір антени є важливим пунктом при проектуванні радіопристроїв. Антену необхідно підібрати під частоту робочого діапазону та узгодити з вихідним каскадом. При хорошому узгодженні потужність передавача

випромінюється в навколишній простір, за поганого – повертається назад. Перевірити параметри антени зручно за допомогою векторного аналізатора.

Одним з таких приладів є аналізатор NanoVNA-F-V2 [24]. Прилад поставляється з набором заглушок та перехідників. Заглушки потрібні для калібрування аналізатора. Заглушка OPEN не має центрального провідника, вона має нескінченний опір (ізолює); у заглушці SHORT центральний провідник замкнутий на корпус (нульовий опір); у заглушки LOAD (сталевого кольору) опір становить 50 Ом. Для перевірки антени додатково потрібний перехідник.

Векторний аналізатор NanoVNA-F2-V2 працює в діапазоні частот від 50 кГц до 3 ГГц. Динамічні діапазони S21: 70 дБ (1,5 ГГц), 60 дБ (3 ГГц); S11: 50 дБ (1,5 ГГц), 40 дБ (3 ГГц). Це означає, що нижче зазначених значень спостерігається спотворення сигналу, що вносяться самим приладом. Для порівняння, векторний аналізатор Tektronix TTR506A має динамічний діапазон > 122 дБ. NanoVNA-F2 V2 має алюмінієвий корпус, який додатково екранує електроніку. Прилад можна підключити до комп'ютера та зберегти дані за допомогою утиліти NanoVNA Saver. Вихідна потужність аналізатора становить -9 дБм (похибка не більше 1 ГГц: ± 1 дБ).

Вимірювання S-параметрів

Теоретично НВЧ характеристики пристрою описують за допомогою матриці S-параметрів. Дані параметри виявились зручними як з математичної точки зору, так і для вимірювання. Фізичний зміст параметрів показано на рис. 4.2.



S11 - коефіцієнт відбиття від входу;

S22 - коефіцієнт відбиття від виходу;

S21 - коефіцієнт передачі "падаючої хвилі" від входу до виходу;

S12 - коефіцієнт передачі від виходу до входу.

Рис. 4.2 S-параметри чотири полюсника

При перевірці антени аналізатором інтерес представляє її комплексний опір та возвратні втрати. Перше можна зрозуміти з кругової діаграми повних опорів – діаграми Сміта. Кожній точці поверхні діаграми відповідає єдине значення комплексного нормованого опору. Активний опір відповідає горизонтальній осі, ємнісна та індуктивна складові зміщують точку на діаграмі вниз і вгору, що перевіряється використанням заглушки. При правильному калібруванні заглушка з опором 50 Ом перемістить точку на екрані аналізатора центр діаграми.

Возвратні втрати показують, наскільки сильно відбивається сигнал, що передається від приймача назад до генератора через невідповідність імпедансу. При ідеальному узгодженні вихідний опір радіо канального трансівера дорівнює вхідному опору антени і вся енергія передавача розсіюється в навколишній простір.

На рис. 4.3 та 4.4 показані результати перевірки штирової та спіральної антен.

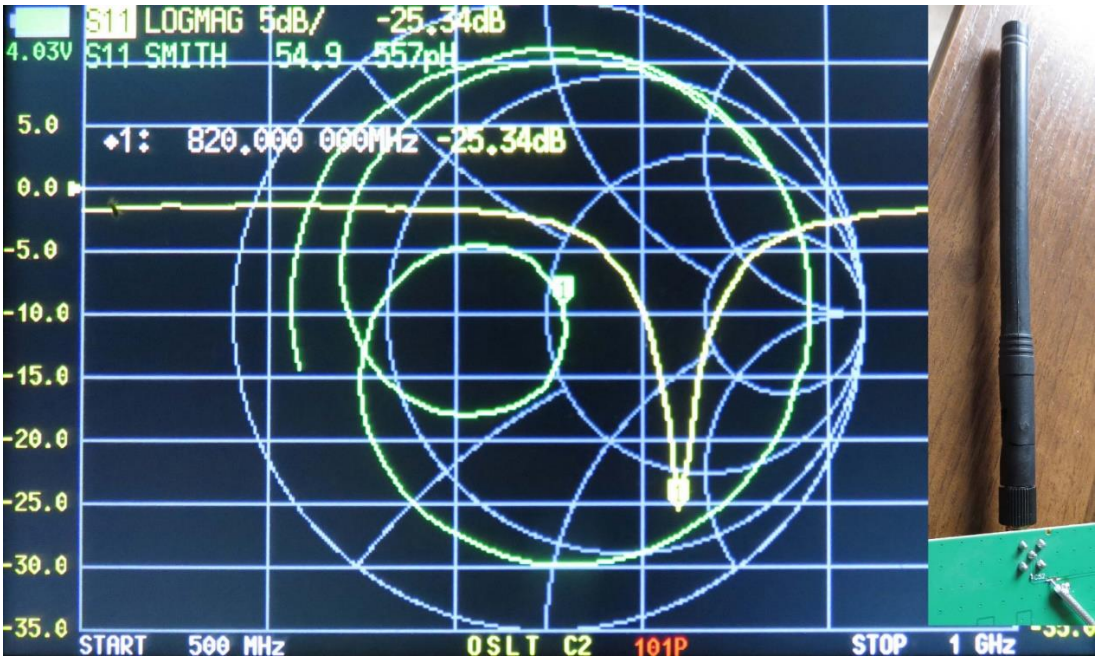


Рис. 4.3 Результат перевірки штирової антени ANT-868-CW-HWR-SMA

Цікаві результати для спіральної антени із заявленою резонансною частотою 868 МГц. Виявилося, що на якість її роботи дуже впливає орієнтація щодо полігону

землі. При перпендикулярному до плати вона показує найкращі, хоча й дуже хороші результати.

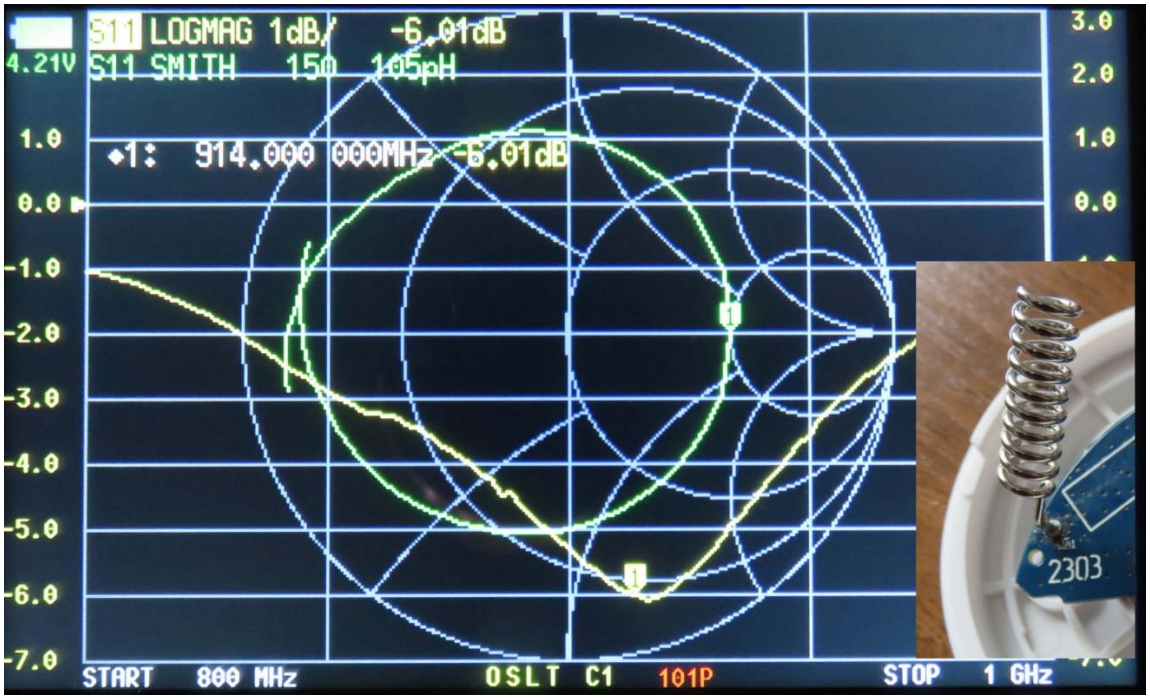


Рис. 4.4 Результат перевірки спіральної антени

Спіральні антени легко розрахувати (за відомою методикою), досить легко виготовити, вони не займають багато місця. Перевірки кількох спіральних антен із різною товщиною дроту, кроком спіралі та виготовлених із різних матеріалів дали посередні результати. Ці антенні мають чималі возвратні втрати.

Для якісної розробки потрібні добрі інструменти. Наразі парк таких інструментів досить широкий: від бюджетних TinySA, NanoVNA та XY-FZ35 до висококласних професійних аналізаторів типу Anritsu S3xxE [25].

Серія портативних аналізаторів об'єднує у собі всі популярні інструменти, які найчастіше використовуються у діапазоні частот до 6 ГГц. У базовій комплектації моделі MS2085A (рис. 4.5) є антенний аналізатор, а моделі MS2089A додатково до антенного аналізатора містять аналізатор спектру. За допомогою опції можна додати двох портовий векторний аналізатор ланцюгів, а підключення зовнішнього датчика USB забезпечує точне вимірювання потужності.



Рис. 4.5 Векторний аналізатор Anritsu MS2085A

При встановленні відповідних опцій для моделей MS2089A, крім класичного аналізатора спектру, доступні: аналіз в реальному часі (з смугою 20 і 40 МГц), векторний аналіз сигналів (з смугою 20 і 40 МГц), генератор, пошук джерел радіоперешкод, нанесення зон покриття на карту.

Векторний аналізатор не вирішує усі проблеми. Навіть при добре спроектованій антені труднощі можуть виникнути у ланцюзі узгодження з вихідним імпедансом трансівера. Не менш важливо підтримувати стабільність несучої частоти, мати уявлення про діаграму спрямованості антени, правильно розрахувати товщини доріжок, правильно розмістити полігони заземлення і навіть врахувати явища пере відбиття у приміщенні, де буде встановлено обладнання.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження антен для засобів радіоелектронної боротьби. Серед антен, що досліджувалися для розробки обрана антена типу «конюшина». Цей тип антен достатньо ефективен для обраної мети, має всі необхідні особливості, а саме: кругову діаграму направленості в горизонтальній площині та підходящу діаграму в вертикальної площині. Окрім того антена технологічна у виконанні та не потребує дорогих матеріалів для виготовлення.

Антена розроблена для заданого діапазону частот, проведені розрахунки конструкції антени та її конструктивних елементів за допомогою онлайн програми для вказаного типу антен. Проведені розрахунки частотної характеристики коефіцієнту стоячої хвилі, а також розрахунки діаграм направленості в горизонтальної та вертикальної площинах. Розроблена технологія виготовлення антени та обрані матеріали для виготовлення.

Проведений огляд сучасних програмних продуктів, які застосовуються при дослідженні та проектуванні антенних пристроїв. Розрахунки антени, що досліджувалася та проектувалася, виконані за допомогою одного з сучасних програмних продуктів ANSYS HFSS.

Проведений аналіз методів вимірювання антенних пристроїв, розглянуті методи забезпечення достовірності та точності проведення вимірювання.

Результати роботи свідчать, що антени типу «конюшина» можуть бути достатньо швидко спроектовані під заданий діапазон частот та виготовлені завдяки використання сучасної обчислювальної технікі та простої технології виготовлення.

Таким чином, магістерська робота зробила певний внесок у розуміння особливостей проектування та виготовлення антени типу «конюшина», її результати можуть бути використані як у практичній діяльності, так і в дослідженнях у антенної техніки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої. Навчальний посібник / [М.Д. Ільїнов, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценок]. – К.: ВІТІ, 2018. – 250 с.

2. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. І. Никольский., 1989. – 544 с. – (Наука).

3. Antenna Basics: Radiation Patterns, Permittivity, Directivity, and Gain [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/antenna-basics-field-radiation patterns-permittivity-directivity-gain/.

4. Марченко С. В. Конспект лекцій з дисципліни «Антени та пристрої мікрохвильової техніки» зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» за освітньо-професійною програмою «Телекомунікації та радіотехніка», Кам'янське; ДДТУ, 2020 р. – 168с.

5. Шокало В.М. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч.2 Випромінювання та поширення радіохвиль [Текст]: підручник для студентів ВНЗ / В.М. Шокало, В.І. Правда, В.А. Усін, В.С. Вунтесмері, Д.В. Грецьких; за ред. В.М. Шокало та В.І. Правди. – Харків, ХНУРЕ: Колегіум, 2010. – 425 с.

6. Ільницький Л.Я., Савченко О.Я., Сібрук Л. В. Антени та пристрої надвисоких частот. - К.: Укртелеком, 2003. - 496 с.

7. ДСТУ 3801-98 Антени. Терміни та визначення – Режим доступу до ресурсу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95609.

8. К.Ротхаммель. АНТЕННЫ. ТОМ 1. -Додека-2005.pdf. Издание 11-е, полностью переработанное и дополненное. Алоизом Кришке. – Режим доступу до ресурсу: https://sprotyvg7.com.ua › uploads › 2023/05 ›.

9. К.Ротхаммель. АНТЕННЫ. ТОМ 2. -Додека-2005.pdf. Издание 11-е, полностью переработанное и дополненное. Алоизом Кришке. – Режим доступу до ресурсу: https://sprotyvg7.com.ua › uploads › 2023/05 ›.

10. Антенно-фидерные устройства. учебное пособие. Ерошенко Д.А., Климов А.И. – Режим доступу до ресурсу: https://studfile.net/preview/16567233/page:9/.

11. Веселовский Кишистоф Системы подвижной радиосвязи. - М.: Горячая линия - Телеком, 2006. - 536 с.

12. Антени для РЕБ систем – Режим доступу до ресурсу: https://equit.com.ua/ua/a516635-antenny.html.

13. Квадрофілярна антена – Режим доступу до ресурсу: https://www.gsmsota.ua/blog/stati/-kvadroflyarna-antena-qfh

14. Антенна клевер – Режим доступу до ресурсу: https://3g-aerial.biz/cloverleaf-antenna

15. Патч-антени – Режим доступу до ресурсу: https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an39.ru.html.

16. Кабель и провод для антенн – Режим доступу до ресурсу: https://mobileparts.pro/komplektuiuchi-dlia-droniv/komponenty-reb/koaksialniy-fiderniy-kabel-fider-hcaayz-50-12-1-2-1m**).**

17. Разъемы коаксиальные – Режим доступу до ресурсу: https://romsat.ua/news/company/connectors-for-coaxial/

18. ДСТУ EN 62305-1:2012 Захист від блискавки. Частина 1. Загальні принципи (EN 62305-1:2011, IDT) – Режим доступу до ресурсу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29300

19. AWR-Microwave-Office – Режим доступу до ресурсу: https://download.freedownloadmanager.org/Windows-PC/AWR-Microwave-Office/FREE.html

20. Advanced Design System – Режим доступу до ресурсу: https://www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html.

21 ANSYS-HFSS – Режим доступу до ресурсу: https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss.

22 CST-STUDIO-SUITE – Режим доступу до ресурсу: https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite

23 FEKO – Режим доступу до ресурсу: https://altair.com/feko

24. NanoVNA-F-V2 – Режим доступу до ресурсу: https://radioscan.com.ua/ua/p1905356808-nanovna-50kgts-15ggts.html

25. Anritsu MS2085A Site Master – Режим доступу до ресурсу: https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/ms208xa

ПРЕЗЕНТАЦІЯ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:

Проект антен для комплексів радіоелектронної боротьби

Студент: Павленко Сергій Олександрович
гр. ТСДМ-63

Київ - 2025

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ РОБОТИ

Наразі в Україні відбуваються широкомасштабні бойові дії. Сучасні воєнні дії відрізняються від попередніх широким застосуванням малої авіаційної техніки – бойових дронів. Для захисту від бойових та розвідувальних дронів використовуються різні технічні засоби. Дуже ефективним засобом захисту є використання методів радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Одним з найбільш поширених та простих методів радіоелектронної боротьби є пригнічення засобів радіоуправління дронами. Для цього використовуються достатньо потужні генератори у відповідних діапазонах частот. Такий генератор випромінює широкосмуговий сигнал заваду.

Тому тема роботи є актуальною.





ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

Мета роботи – розрахунок конструкції та креслень антен для засобів радіоелектронної боротьби, розрахунок основних характеристик розроблених антен.

Об'єкт дослідження – антенні пристрої для засобів радіо електронної боротьби.

Предмет дослідження – методи розрахунку та побудови антен для засобів радіоелектронної боротьби.

Короткий зміст роботи - у роботі зроблений огляд видів антен, що використовуються в засобах радіоелектронної боротьби; проведено розрахунки та розроблено один з видів антен для заданого діапазону частот; розраховані характеристики розробленої антени та описані методи вимірювання цих характеристик.

ОСНОВНІ ФУНКЦІЇ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕН

Функції	Характеристики	Параметри
Перетворення енергії, що передається по лінії, в енергію полів, які випромінюються у вигляді електромагнітних хвиль	Залежність потужності, що випромінюється від частоти Залежність коефіцієнта стоячої хвилі від частоти	Максимальна потужність Коефіцієнт корисної дії Опір випромінювання Опір втрат Смуга робочих частот
Формування діаграми спрямованості	Діаграма спрямованості Поляризаційна діаграма	Коефіцієнт направленої дії Дзюча поверхня Смуга робочих частот

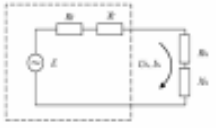
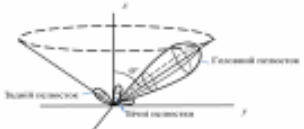


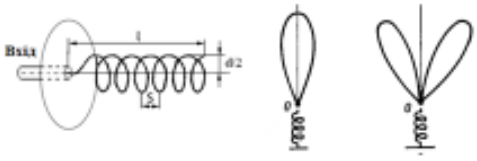
Схема підключення антени



ДН антени

$$D(\theta,\varphi)=\frac{P_{\Sigma 0}}{P_{\Sigma н}}\Big|_{\substack{r-\text{const}\\ E_0=E_н}} \quad \textbf{КНД}$$

$$G(\theta,\varphi)=\frac{P_{\Sigma 0}}{P_{\Sigma н}}\eta_A=\eta_A D(\theta,\varphi). \quad \textbf{Кпідс}$$



Спіральна антена та її ДН при різних значеннях d/λ

АНТЕНИ ДЛЯ ЗАСОБІВ РЕБ

Основні типи антен засобів РЕБ

Тип антени	Категорія	Призначення	Особливості
Квадрофілярні (QFH)	Широкосмугові	Глушіння GPS/ГНСС	Циркулярна поляризація, ідеальні для супутникових систем
Клеверні (конюшина)	Широкосмугові	Прийом/глушіння дронів	Компактні, всеспрямовані, стабільна поляризація
Колінеарні	Широкосмугові	Контроль у всіх напрямках	Циркулярна поляризація, вертикальна структура
Патч антени	Направлені, середньосмугові	Мобільні або дронові РЕБ	Компактні, плоскі, точне направлення



Квадрофілярна



«Конюшина»

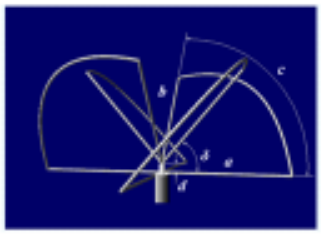


Колінеарна

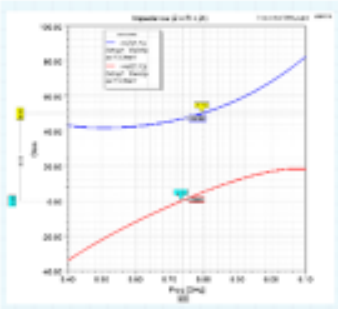


Патч

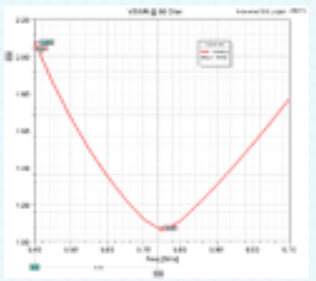
АНТЕНА «КОНЮШИНА» ТА ЇЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Схематичне зображення



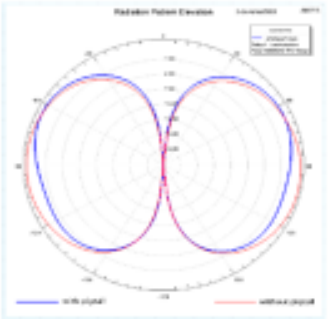
Вхідний імпеданс



КСХ

Результат розрахунку

Кількість пелюсток антени: 3
Частота f: **375** МГц
Довжина хвилі λ: 799 мм
Розміри: a 202 мм; b 171 мм; c 381 мм.
Діаметр проводу dw: 5.2 мм (4 AWG#)
Розмір d (в місці підключення): 33.8 мм
Довжина проводу пелюстки: 754 мм
Розкрив пелюстки (кут між **a** та **b**): 108°
Кут нахилу пелюстки к горизонту δ: 55°.



ДН у вертикальній площині



в горизонтальній

ВИГОТОВЛЕННЯ АНТЕНИ

Вихідні матеріали для виготовлення



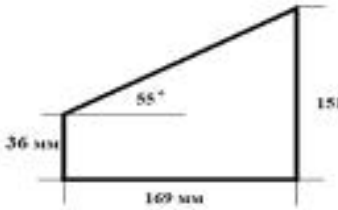
Провід AWG6



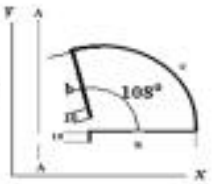
Кабель коаксіальний HCAAYZ-50-12 (1/2")



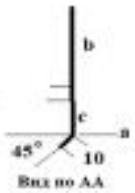
Роз'єм типу N коаксіального кабелю

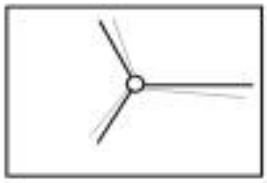


Шаблон нахилу пелюстки

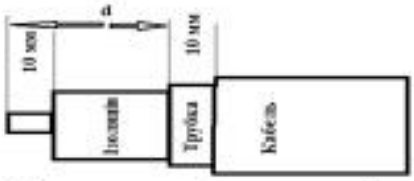


Заготовка пелюстки

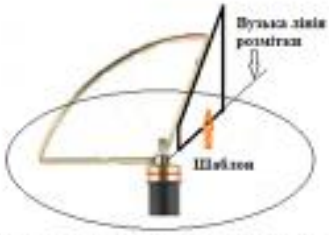




Розмітка розташування



Підготовка кабелю для пайки



Встановлення кута нахилу



Готова антена

ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНИ

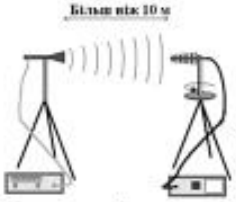


Схема вимірювання ДН та коефіцієнту підсилення

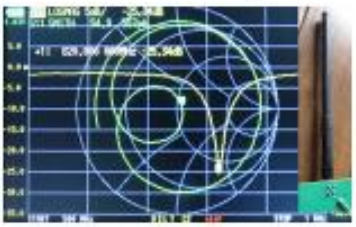
S-параметри чотири полюсника



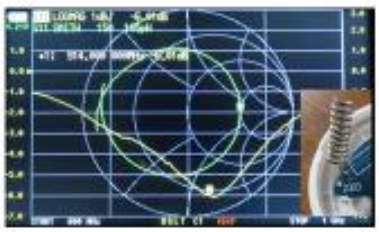
Пояснення S-параметрів чотири полюсника

S11 - коефіцієнт відбиття від входу;
S22 - коефіцієнт відбиття від виходу;
S21 - коефіцієнт передачі "падаючої хвилі" від входу до виходу;
S12 - коефіцієнт передачі від виходу до входу.

Результати вимірювання



Штирова антена



Спіральна антена

Сучасний векторний аналізатор



Anritsu MS2085A

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження антен для засобів РЕБ. Серед антен, що досліджувалися для розробки обрана антена типу «конюшина».

Антена розроблена для заданого діапазону частот, проведені розрахунки конструкції антени та її конструктивних елементів за допомогою онлайн програми для вказаного типу антен. Проведені розрахунки частотної характеристики коефіцієнту стоячої хвилі, а також розрахунки діаграм направленості в горизонтальної та вертикальної площинах. Розроблена технологія виготовлення антени та обрані матеріали для виготовлення.

Проведений огляд сучасних програмних продуктів, які застосовуються при дослідженні та проектуванні антенних пристроїв. Розрахунки антени, що досліджувалася та проектувалася, виконані за допомогою одного з сучасних програмних продуктів ANSYS HFSS.

Результати роботи свідчать, що антени типу «конюшина» можуть бути швидко спроектовані під заданий діапазон частот завдяки використання сучасної обчислювальної технікі та виготовлені завдяки простої технології.

Таким чином, магістерська робота зробила певний внесок у розуміння особливостей проектування та виготовлення антени типу «конюшина», її результати можуть бути використані як у практичній діяльності, так і в дослідженнях у антенної техніки.

Дякую за увагу.

• • •

Доповідь закінчено.