

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет Інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до бакалаврської дипломної роботи на тему:

**«ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ ТА РОЗМІРІВ ДИПОЛЬНОЇ АН-
ТЕНИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ»**

Виконав: студент 4-го курсу, групи ТКР-206,
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Шрейтер О.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС

Семенов А.О.
(прізвище та ініціали)

«11» 06 2024 р.

Рецензент: д.т.н., доц., професор каф. ІКСТ

Михалевський Д.В.
(прізвище та ініціали)

«12» 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«12» 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Інформаційних електронних систем
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІРТС
Олександр ОСАДЧУК
25.03 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Шрейтеру Олександру Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження впливу форми та розмірів дипольної антени на ефективність її випромінювання»
керівник роботи Семенов Андрій Олександрович, д.т.н., проф., проф. каф. ІРТС
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від “11”03 2024 року № 80
2. Строк подання студентом роботи 07 06 2024 року
3. Вихідні дані до роботи: робочий діапазон частот для даної дипольної антени становить від 0.5 до 1.5 ГГц. Ширина діаграми спрямованості варіюється залежно від розміру антени: оптимального, зменшеного у 1.5 рази та збільшеного у 1.5 рази. Коефіцієнт стоячої хвилі у фідері не перевищує 1.5. Поляризація електромагнітного поля антени є горизонтальною. Тип антени, яка розглядається в роботі — дипольна антена з оптимальним розміром, а також її варіації зменшені та збільшені у 1.5 рази.
4. Зміст текстової частини: Вступ. Основні теоретичні відомості про антени. Загальні відомості про дипольні антени. Дослідження параметрів дипольної антени різних розмірів. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Основні теоретичні відомості про дипольні антени. Моделювання дипольної антени за допомогою програми Ansys HFSS. Графіки збіжності. Графіки залежності S-параметру від частоти. Графіки полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 0^\circ$. Графіки полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 90^\circ$. Графіки накладання поля випромінювання.

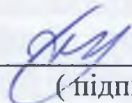
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		за-вдання видав	виконання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор, професор каф. ІРТС Семенов А.О.		
Охорона праці	професор кафедри БЖДПБ, професор, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 18.03.2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БДР	14.02.2024-28.02.2024	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2024-10.03.2024	
3.	Затвердження теми. Розробка завдання на БДР.	11.03.2024-31.03.2024	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.04.2024-06.05.2024	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки . Експериментальне дослідження.	07.05.2024-18.05.2024	
6.	Розробка графічної частини БДР	19.05.2024-22.05.2024	
7.	Охорона праці (ОП)	23.05.2024-28.05.2024	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	29.05.2024-05.06.2024	
9.	Нормоконтроль	06.06.2024-07.06.2024	
10.	Попередній захист БДР, доопрацювання, рецензування БДР	08.06.2024-10.06.2024	
11.	Захист БДР ЕК	11.06.2024-13.06.2024	

Студент  Шрейтер О.С.
(підпис)Керівник роботи  Семенов А.О.
(підпис)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.383.9

Дослідження впливу форми та розмірів дипольної антени на ефективність її випромінювання. Бакалаврська дипломна робота зі спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Радіотехніка. Вінниця: ВНТУ, 2024. 104 с.

На укр. мові. Рисунків 97, таблиць 6, бібліографія 39.

Метою даної бакалаврської дипломної роботи є теоретичне вивчення та експериментальне дослідження дипольної антени. В даній роботі розглянуто призначення, принцип дії антени, а також зроблений літературний огляд сучасних досягнень. Побудовано діаграми спрямованості антен різних розмірів при випромінюванні хвилі Н10 в залежності від амплітуди випромінювання в полярній системі координат. Побудовано залежність коефіцієнта спрямованої дії довжини хвилі в діапазоні довжин хвиль.

У бакалаврській дипломній роботі здійснено моделювання дипольної антени різної форми та розмірів. Отримано результати теоретичних розрахунків і математичного моделювання спрямованих властивостей дипольної антени. Отримано результати комп'ютерного моделювання спрямованих властивостей дипольної антени з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

Також у бакалаврській дипломній роботі проведено розрахунки розділу безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: дипольна антена, діаграма спрямованості, електромагнітне випромінювання, електромагнітна хвиля, форма антени, розмір антени, діапазон частот.

ABSTRACT

Shreiter O. S. Investigation of the influence of dipole antenna shape and size on its radiation efficiency. A report for bachelor's thesis in speciality 172 - Telecommunications and radio-engineering, educational programme – Radio-engineering. Vinnytsia: VNTU, 2024. 104 p.

In Ukrainian. Figures 97, tables 6, bibliography 39.

This bachelor's thesis is devoted to the theoretical study and experimental investigation of a dipole antenna. The paper discusses the basic principles of dipole antennas, their structural and radiated characteristics, and provides a literature review of current achievements in this field.

The main objective of the paper is to study the influence of the shape and size of a dipole antenna on its radiation efficiency. To achieve this goal, a number of tasks were set, including the analysis of existing methods for the construction and use of dipole antennas, numerical calculation and mathematical modelling of their radiation patterns, and computer study of the directional properties of antennas using specialised software.

The paper investigates the parameters of a dipole antenna and determines the dependence of its characteristics on geometrical parameters. It is established that optimisation of the antenna shape and dimensions can significantly improve its radiation characteristics.

In his bachelor's thesis, he also calculated the life safety section.

Keywords: dipole antenna, radiation pattern, electromagnetic radiation, electromagnetic wave, antenna shape, antenna size, frequency range.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО АНТЕНИ.....	9
1.1 Призначення антен та їх загальна характеристика.....	9
1.2 Основні характеристики антени	11
2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДИПОЛЬНІ АНТЕНИ	19
2.1 Будова та принцип дії дипольних антен	19
2.2 Варіації диполів	21
2.1.1 Короткий диполь	21
2.1.2 Дипольні антени різної довжини	23
2.1.3 Напівхвильовий диполь	25
2.1.4 Симетричний диполь	26
2.1.5 Інші варіанти антен	28
2.1.6 Вертикальні(монопольні) антени	30
2.3 Дипольні характеристики антени	32
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИПОЛЬНОЇ АНТЕНИ.....	40
3.1 Вибір методів та засобів моделювання	40
3.2 Моделювання дипольної антени за допомогою програми Ansys HFSS.....	40
3.2.1 Моделювання зменшеної у 1.5 рази від досліджуваного розміру дипольної антени.....	58
3.2.2 Моделювання збільшеної у 1.5 рази від досліджуваного розміру дипольної антени.....	61
3.3 Порівняння результатів моделювання	65
3.3.1 Порівняльний аналіз графіків збіжності.....	65
3.3.2 Порівняльний аналіз кількості вирішених тетраедрів	67
3.3.3 Порівняльний аналіз графіків залежності S-параметру від частоти.....	68
3.3.4 Порівняльний аналіз графіків полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 0^\circ$	70
3.3.5 Порівняльний аналіз графіків полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 90^\circ$	73

3.3.6 Порівняльний аналіз графіків накладення поля випромінювання.....	75
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	77
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	78
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	81
4.3 Пожежна безпека.....	88
ВИСНОВКИ	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративний матеріал.....	97
Додаток Б (обов'язковий). Протокол перевірки навчальної (бакалаврської дипломної) роботи	98

ВСТУП

Актуальність теми

Дипольні антени є одним з найпоширеніших типів антен, які використовуються в широкому спектрі застосувань, від радіозв'язку до радіолокації. Вони відрізняються простотою конструкції, високою ефективністю та надійністю. Дипольні антени застосовуються як самостійні антени, так і елементи більш складних антенних систем. Зокрема, вони знаходять широке використання в діапазоні частот від кількох МГц до кількох ГГц. Вивчення впливу форми та розмірів дипольної антени на її ефективність є актуальним завданням, оскільки дозволяє оптимізувати характеристики антени для різних умов експлуатації та забезпечити ефективність передачі та прийому сигналів.

Аналіз останніх досліджень

Останні дослідження у галузі дипольних антен зосереджені на оптимізації їх параметрів для покращення характеристик випромінювання. Зокрема, досліджуються методи зменшення розмірів антен без значного погіршення їх характеристик, вплив матеріалів і конструкційних параметрів на властивості випромінювання диполів, а також використання сучасних методів комп'ютерного моделювання для аналізу та проектування антен.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Ця робота проводиться в рамках прикладних науково-дослідних робіт, спрямованих на розвиток методів і засобів оптимізації антенних систем для різних застосувань. Зокрема, дослідження здійснюються відповідно до науково-дослідної програми "Елементи і пристрої радіоелектронних та інформаційно-вимірювальних систем" Вінницького національного технічного університету. Метою цих досліджень є підвищення ефективності та надійності антенних систем за рахунок оптимізації їх параметрів.

Метою роботи є дослідження та оптимізація параметрів дипольної антени з метою покращення її характеристик випромінювання. Основний акцент робиться на вплив форми та розмірів антени на її ефективність.

Задачі досліджень

1. Провести аналіз існуючих методів та засобів побудови та використання дипольних антен.
2. Виконати математичне моделювання діаграми спрямованості дипольної антени в робочому діапазоні частот.
3. Отримати результати комп'ютерного дослідження спрямованих властивостей дипольної антени з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.
4. Дослідити вплив електромагнітного випромінювання на здоров'я людини та виконати розділ безпеки життєдіяльності.

Об'єктом дослідження є хвильові явища та процеси перетворення енергії спрямованого поширення радіохвиль всередині дипольної антени при їх випромінюванні назовні.

Предметом дослідження є параметри та характеристики дипольної антени, зокрема, вплив форми та розмірів антени на її ефективність випромінювання.

Новизна отриманих результатів.

1. Встановлено, що оптимізація форми та розмірів дипольної антени може значно покращити її характеристики випромінювання.
2. Проведено чисельне моделювання та отримано результати, які показують залежність характеристик дипольної антени від її геометричних параметрів.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО АНТЕНИ

1.1 Призначення антен та їх загальна характеристика

Антенни діють як перетворювачі між провідними хвилями та електромагнітними хвилями що вільно поширюються у просторі (рис. 1.1).

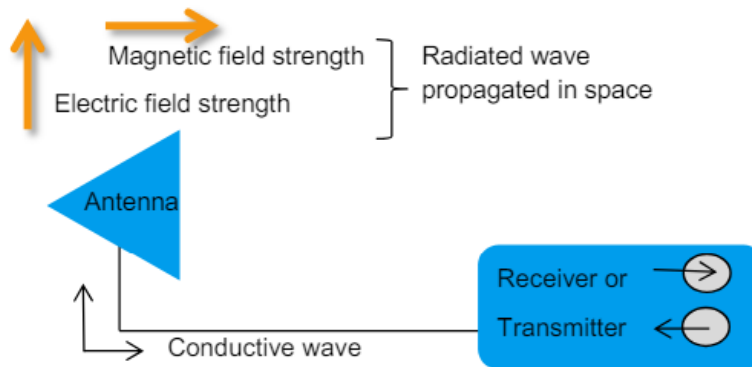


Рисунок 1.1 – Основні функції антени

Їх назва запозичена із зоології, де латинське слово *antennae* використовується для опису довгих тонких щупалець, якими володіють багато комах [2].

Найстаріші існуючі антени, такі як ті, що використовував Генріх Герц у 1888 році під час своїх перших експериментів, щоб довести існування електромагнітних хвиль, в теорії і на практиці не дуже відрізнялися від радіочастотного генератора.

Антенна може бути отримана з паралельного контуру, який складається з котушки індуктивності та конденсатора. Якщо пластини конденсатора розігнути, а індуктивність котушки індуктивності зменшити до індуктивності самого дроту, вийде дипольна антенна, як показано в крайньому правому положенні на рис. 1.2.

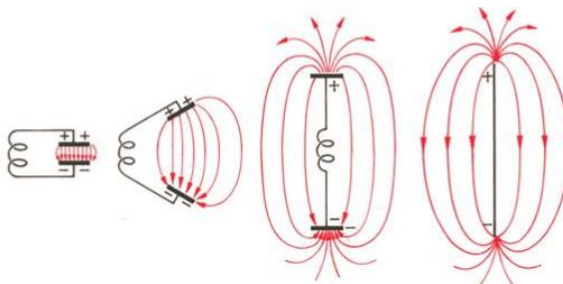


Рисунок 1.2 – Модель антени Генріха Герца

Насправді, резонансні контури все ще часто використовуються навіть сьогодні як засіб пояснення індивідуальних властивостей антен. Лише близько 1900 року або навіть пізніше, коли будувалися передавальні та приймальні станції, було зроблено чітке розмежування і антени були класифіковані як окремі компоненти радіосистем [4].

На рис. 1.3 видно, що антена є важливим елементом будь-якої радіосистеми, оскільки вона діє як ланка ланцюга. Тому на загальну продуктивність суттєво впливають характеристики передавальної та приймальної антен.



Рисунок 1.3 – Блок-схема радіозв'язку

На перший погляд, сучасні антени все ще можуть виглядати дуже схожими на стародавні моделі. Однак сьогодні вони оптимізовані за рахунок значних витрат для їхнього цільового застосування. Технологія комунікаційних антен в першу чергу прагне перетворити один тип хвиль в інший з найменшими втратами [5].

Ця вимога менш важлива у випадку тестових антен, які призначені для забезпечення точного вимірювання напруженості поля в місці встановлення для підключеного тестового приймача; натомість їхні фізичні властивості повинні бути відомі з високою точністю.

Пояснення фізичних параметрів, за допомогою яких можна описати і оцінити поведінку кожної антени, ймовірно, має більш широке загальне застосування; однак, наступні розділи можуть описати лише деякі з багатьох форм антен, які використовуються сьогодні. Визначення таких параметрів, як діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення, опір випромінювання та ширина смуги пропускання, є ключовими для розуміння роботи та ефективності антен [8].

1.2 Основні характеристики антени

Як згадувалося у вступі, антени мають функцію перетворення одного типу хвиля в іншу. Напрямок перетворення енергії не має значення для принцип роботи або для простоти розуміння. Передавальний і тому приймальну антену можна розглядати так само (принцип взаємності), і параметри, описані в цьому розділі, однаково дійсні для передачі та прийом. Це навіть стосується випадків, коли параметри в деяких випадках можна виміряти лише для передачі або для прийому, або якщо їх специфікація здається значущою лише для один із цих режимів. Єдиним винятком є активні антени: це чистий прийом антени, вони невзаємні. Крім того, необхідно чітко розрізняти передавальні та приймальні антени, якщо, наприклад, брати до уваги максимальну потужність передавача. Однак це не має ніякого відношення до характеристик і принципу роботи [11].

Щільність випромінювання. Найпростішою антеною, яку можна собі уявити, є ізотропний випромінювач, який не існує на практиці, але є чудовою теоретичною моделлю. Ізотропний випромінювач, який є безрозмірною точкою в просторі, генерує хвилі зі сферичними хвильовими фронтами, які випромінюються рівномірно в усіх напрямках. Коли до нього прикладена ідеально підібрана потужність випромінювача P_s то на відстані r створюється густина випромінювання:

$$S = \frac{P_s}{4\pi r^2}, \#1.1$$

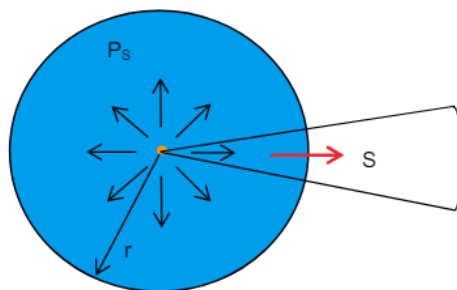


Рисунок 1.3 – Ізотропний випромінювач в однорідному просторі

Густина випромінювання (часто також відома як густина потужності) також може бути визначена у далекому полі як добуток напруженості електричного та магнітного полів відповідно до:

$$S = E \cdot H, \#1.2$$

Структура випромінювання. Тривимірна радіаційна поведінка антен описується їх випромінюванням (зазвичай у дальньому полі). Як пояснювалося раніше, тільки ізотропний радіатор може демонструвати однакове випромінювання в кожному просторовому напрямку, але цей випромінювач не може бути таким реалізований для будь-якої заданої поляризації і тому в основному підходить як модель і стандарт порівняння. Диполі і монополі володіють спрямованістю [14]. Електрично Дипольні антени різної кий диполь у вільному просторі має тривимірну діаграму спрямованості, показану на рис. 1.4 з нулями в напрямку осі антени.

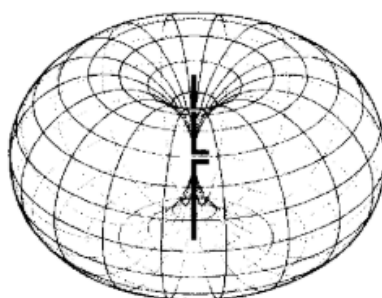


Рисунок 1.4 – Тривимірне випромінювання дипольної антени

Хоча картина випромінювання насправді є тривимірною, зазвичай описують цю поведінку за допомогою двох плоских діаграм спрямованості, які також називають головними плоскими діаграмами спрямованості. Їх можна отримати з просторових характеристик випромінювання, дивлячись на січну площину - зазвичай через початок координат і максимум випромінювання [15]. Сферичні координати як показано на рис. 1.5, зазвичай використовуються для опису місцезнаходження у тривимірному просторі.

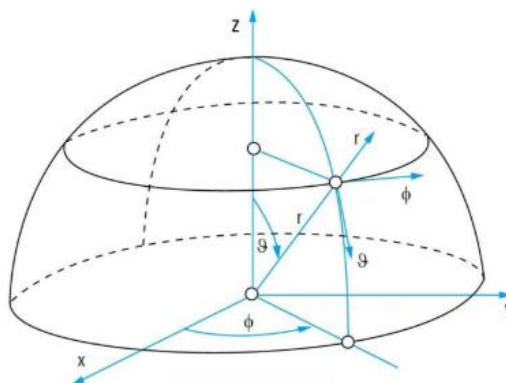


Рисунок 1.5 – Пояснення сферичних координат

Горизонтальна діаграма (рис. 1.5) показує напруженість поля як функцію азимутального кута ϕ при фіксованому θ (зазвичай $\theta = 90^\circ$).

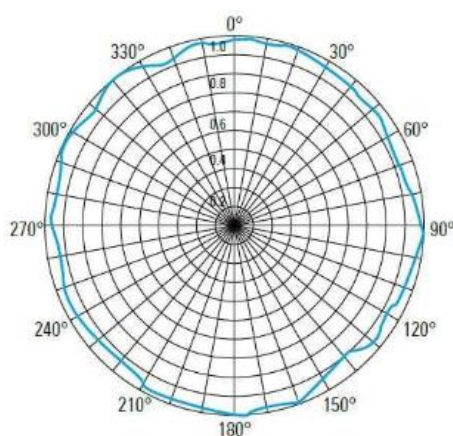


Рисунок 1.6 – Горизонтальна діаграма спрямованості дипольної антени

Вертикальна діаграма (рис. 1.7) показує напруженість поля як функцію θ для фіксованого ϕ (зазвичай $\phi = \pm 90^\circ$ або $0^\circ/180^\circ$).

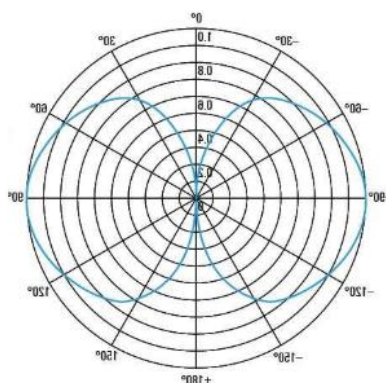


Рисунок 1.7 – Вертикальна діаграма спрямованості дипольної антени

Характеристика діаграми спрямованості антени з двома основними площинними діаграмами спрямованості є адекватна для антен з добре керованою діаграмою спрямованості - це означає, що не так вже й багато інформації втрачається, коли показано лише дві площини.

У літературі або специфікаціях також часто зустрічаються терміни діаграма спрямованості по азимуту або діаграма спрямованості по висоті. також часто зустрічаються терміни азимутальна модель або модель висот. Термін "азимут" описує посилення на "горизонт" або "горизонталь", тоді як термін "висота" описує горизонталі", тоді як термін "висота" описує відношення до "вертикалі". Якщо ці два терміни використовуються для опису діаграми спрямованості антени, вони припускають, що під час вимірювання антена встановлена в тому положенні, в якому вона буде зазвичай використовуватися [20].

Іншим поширеним позначенням для двох основних діаграм спрямованості є діаграма спрямованості в Е-площині і діаграма спрямованості в площині Н. Вони безпосередньо залежать від орієнтації випромінювачів антени. випромінювачів антени. Отже, вони не залежать від орієнтації монтажу антени. антени.

Зазвичай діаграми спрямованості антен зображують у вигляді графіків у полярних координатах. Це має ту перевагу, що це дає змогу швидко візуалізувати випромінювання в усіх можливих напрямках. У деяких випадках (наприклад, для високоспрямованих антен) також може бути корисно побудувати діаграму спрямованості в декартових координатах - тому що це показує більше деталей головного променя і прилеглих бічних пелюсток (рис. 1.8).

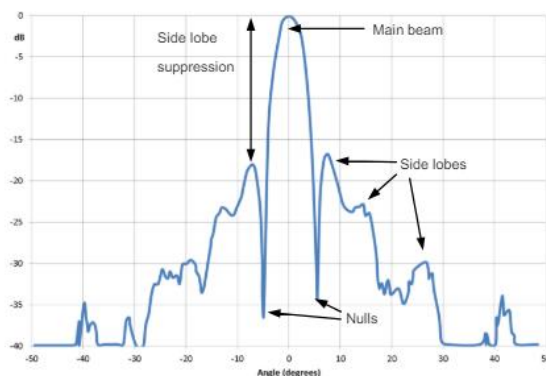


Рисунок 1.8 – Картина випромінювання в декартових координатах

З діаграми спрямованості випромінювання можна отримати наступні додаткові параметри (рис 1.9):

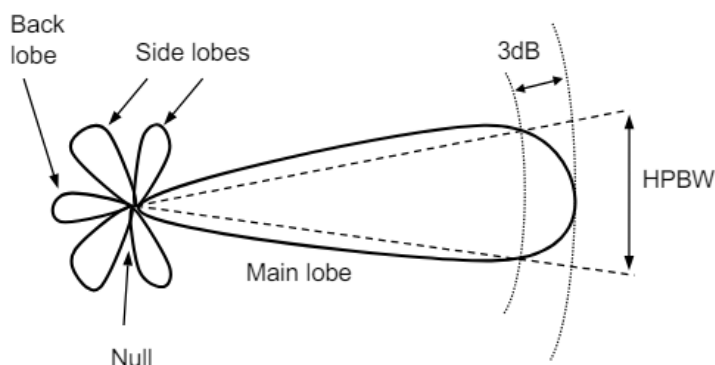


Рисунок 1.9 – Інші параметри в діаграмі спрямованості

- Придушення бічних пелюсток (або рівень бічних пелюсток) - це міра співвідношення між головною пелюсткою і найвищою бічною пелюсткою.
- Ширина діаграми спрямованості на половину потужності (HPBW) - це кут між двома точками в головній пелюстці діаграми спрямованості антени, які знаходяться нижче від максимуму на 3 дБ. Вона зазвичай визначається для обох діаграм спрямованості.
- Відношення передньої до задньої діаграми спрямованості визначає рівень випромінювання з задньої частини спрямованої антени. Це відношення пікового коефіцієнта підсилення в прямому напрямку до коефіцієнта підсилення у зворотному (180°) напрямку. Зазвичай виражається в дБ.

Підсилення. Коефіцієнт підсилення G , що відповідає коефіцієнту спрямованості, є відношенням інтенсивності випромінювання $F_{\max}$, отриманої в головному напрямку випромінювання, до інтенсивності випромінювання F_{i0} , яка була б ізотропним випромінювачем без втрат з такою самою входною потужністю P_{i0} .

$$G = \frac{F_{\max}}{F_{i0}}, \text{ де } F_{i0} = \frac{P_{t0}}{4\pi}, \#1.3$$

На відміну від коефіцієнта спрямованості, ефективність антени η враховується у наведеному вище рівнянні, оскільки застосовується наступне:

$$G = \eta \cdot D \#1.4$$

Для антени з ККД $\eta = 100\%$ це означає, що коефіцієнт підсилення і спрямованість рівні. На практиці це навряд чи так, тому коефіцієнт підсилення, який можна легко визначити під час вимірювань, є параметром, який використовується частіше.

Підсилення та спрямованість часто виражаються в логарифмічній формі:

$$\frac{g}{db} = 10 \log G \text{ або } \frac{d}{db} = 10 \log D \#1.5$$

Всупереч загальноприйнятим правилам і стандартам, існує усталена практика вказувати посилення з додатковою літерою після dB:

- дБі відноситься до ізотропного випромінювача;
- дБд відноситься до напівхвильового диполя;

Наприклад, застосовується наступне перетворення: $0 \text{ дБд} \approx 2,15 \text{ дБі}$.

Практичний коефіцієнт підсилення. Хоча визначення коефіцієнта підсилення передбачає ідеальне узгодження між антеною і кабелем і приймачем або передавачем, на практиці це рідко буває так. Отже, що вимірюється в умовах неідеального узгодження, називається практичним коефіцієнтом підсилення антени [16].

Коефіцієнт підсилення можна визначити з практичного коефіцієнта підсилення за такою формулою:

$$G = G_{\text{практ}} \frac{1}{1 - |r^2|}, \#1.6$$

де величина неузгодженості виражається величиною коефіцієнта відбиття Γ .

Ефективна площа. Ефективна площа A_w антени - це параметр, спеціально визначений для приймальних антен. Це міра максимальної прийнятої потужності P_r яку може прийняти антена від плоскої хвилі з густиною потужності S :

$$P_{r\max} = S \cdot A_e \quad \#1.7$$

Хоча ефективну площу антени цілком можна уявити як реальну площу перпендикулярну до напрямку поширення падаючої хвилі, вона не обов'язково ідентична з геометричною площею A_g антени. Зв'язок між ефективною і геометричною площами ефективною і геометричною площами описується ефективністю апертури q :

$$q = \frac{A_e}{A_g} \quad \#1.8$$

Ефективна площа антени може бути перетворена в коефіцієнт підсилення і навпаки за допомогою формули:

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G \quad \#1.8$$

Вхідний опір. Одним з найважливіших параметрів антени є її вхідний опір:

$$Z_{вх} = R_{вх} + jX_{вх} \quad \#1.9$$

Це імпеданс, присутній у точці живлення антени. Його дійсну частину R_{in} можна розділити на опір випромінювання R_v і опір втрат $R_{вт}$.

$$R_{вх} = R_v + jX_{вт} \quad \#1.9$$

Слід зазначити, однак, що опір випромінювання, як добуток випромінюваної потужності і квадрата середньоквадратичного значення струму антени випромі-

нюваної потужності на квадрат середньоквадратичного значення струму антени, є просторово залежним. Це стосується і самого струму антени. Отже, при визначенні опору випромінювання вказуючи опір випромінювання, необхідно вказувати його місце розташування на антені [18].

Номінальний опір. Номінальний опір Z_n є лише довідковою величиною. Зазвичай він вказується як характеристичний опір антенного кабелю, до якого має бути приведений опір антени повинен бути приведений у відповідність (як, $Z_n = 50 \text{ Ом}$).

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДИПОЛЬНІ АНТЕНИ

2.1 Будова та принцип дії дипольної антени

Дипольна антена - це тип радіочастотної антени, яка включає два провідні елементи, такі як дроти або стрижні, де довжина металевого дроту становить приблизно половину найбільшої довжини хвилі у вільному просторі на робочій частоті. У центрі антени провідні матеріали розділені ізолятором, який називається секцією антени.



Рисунок 2.1 – Дипольна антена

Джерело радіочастотної напруги подається в середину антени, потім напруга і струм, що подаються через два провідні елементи, генерують електромагнітний або радіосигнал, і цей сигнал випромінюється за межі антени. У центрі такої антени напруга мінімальна, а струм максимальний, тоді як у дипольній антені напруга максимальна, а струм мінімальний на двох кінцях [22].

Дипольна антена складається з двох провідних елементів, таких як дроти і стрижні або дроти, де фідер знаходиться в центрі, а випромінюючі секції антени розташовані по обидва боки. Довжина металевих дротів дорівнює половині найбільшої довжини хвилі, тобто $\lambda/2$ у вільному просторі на робочій частоті.

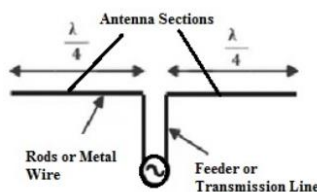


Рисунок 2.2 – Структура дипольної антени

Провідний елемент в антені розділений посередині на дві секції через ізолятор, який називається секцією антени. Ці секції просто підключаються до коаксіального кабелю або фідера в середині антени. Довжина хвилі - це відстань між двома послідовними найвищими або найнижчими точками.

Тут довжина випромінюючого елемента може визначатися кількома властивостями центру антени - робочою частотою, імпедансом фідера тощо. У цій антені довжина диполя є важливим параметром [29].

Будь-який тип антени буде працювати як на передачу, так і на прийом. У різних бездротових додатках антена може бути активована між передавачем і приймачем.

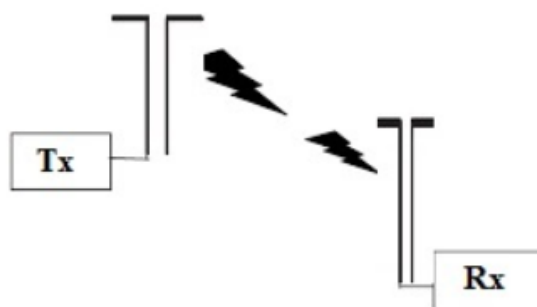


Рисунок 2.3 – Передавач та приймач

Передавач з дипольною антеною. У секції передавача дипольна антена генерує радіохвилі. На антену подається напруга на бажаній частоті. Таким чином, напруга на елементах цієї антени і потік струму через них створюють як магнітні, так і електричні хвилі.

Передавач в антені - це основний елемент, який створюється за допомогою провідника. Тут провідник несе електричний струм, де інтенсивність струму буде коливатися з часом і перетворюватися в радіочастотне випромінювання, яке передається в просторі.

Приймач дипольної антени. На ділянці приймача електромагнітна хвиля, що протікає через дипольну антену, індукує невелику напругу. В результаті антена стане джерелом сигналу для входу приймача. Приймач антени виконує зворотну

операцію передавача. Він приймає радіочастотне випромінювання і перетворює його в електричний струм в електричному ланцюзі, який підключений до антени.

Як тільки джерело радіочастотної напруги подається в центр двох секцій антени, потік напруги і струму через два провідні елементи може генерувати електромагнітний або радіохвильовий сигнал, який буде випромінюватися за межі антени.

У центрі цієї антени напруга мінімальна, а струм максимальний. На противагу цьому, струм мінімальний, а напруга максимальна на кінцях антени. Це розподіл струму дипольної антени [25].

Отже, дипольна антена перетворює сигнали з електричних в радіочастотні електромагнітні і випромінює їх на передавальному кінці і змінює радіочастотні електромагнітні сигнали в електричні на приймальному боці.

2.2 Варіації диполів

2.1.1 Короткий диполь

Короткий диполь - це диполь, утворений двома провідниками із загальною довжиною ℓ , значно меншою за половину довжини хвилі ($\frac{1}{2}\lambda$). Короткі диполі іноді використовуються в тих випадках, коли повний півхвильовий диполь був би занадто великим. Їх можна легко проаналізувати, використовуючи результати, отримані нижче для фіктивного диполя Герца, фіктивного об'єкта. Оскільки він коротший за резонансну антену (на половину довжини хвилі), його імпеданс у точці входу включає великий ємнісний опір, що вимагає навантажувальної котушки або іншої узгоджувальної мережі для того, щоб бути практичним, особливо як передавальна антена [24].

Для знаходження електричного і магнітного полів далекого поля, генерованих коротким диполем, ми використовуємо результат, показаний нижче для диполя Герца (елемента з нескінченно малим струмом) на відстані r від струму і під кутом θ до напрямку струму, як такий, що існує:

$$H_{\phi} = j \frac{I_h l k}{4\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \sin(\Theta), \#(1.1)$$

$$E_{\Theta} = \zeta_0 H_{\phi} = j \frac{\zeta_0 I_h l k}{4\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \sin(\Theta), \#(1.2)$$

де випромінювач складається зі струму $I_h e^{j\omega t}$ на короткій довжині, а $j^2 = -1$ в електроніці замінює звичайні математичні символи для “квадратного кореня з -1”, ω – кутова частота ($\omega = 2\pi f$) і k – хвильове число ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$), ζ_0 – це імпеданс вільного простору ($\zeta_0 = 377 \Omega$), тобто відношення напруженості електричного та магнітного полів плоскої хвилі у вільному просторі.

Точка живлення зазвичай знаходиться в центрі диполя, як показано на рисунку(2.4)

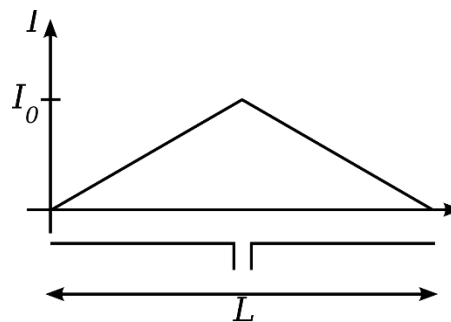


Рисунок 2.4 – Точка живлення диполя

Струм вздовж дипольних плечей приблизно описується як пропорційний до $(\sin(kz))$, де z - це відстань до кінця плеча. У випадку короткого диполя це, по суті, лінійне падіння від I_0 у точці введення до нуля на кінці. Отже, можна порівняти диполь Герца з ефективним струмом I_h , що дорівнює середньому струму по провіднику, тому $I_h = \frac{1}{2} I_0$. З такою заміною наведені вище рівняння наближено описують поля, що генеруються коротким диполем, який живиться струмом I_0 .

З розрахованих вище полів можна знайти випромінюваний потік (потужність на одиницю площі) в будь-якій точці як величину дійсної частини вектора Пойнтінга, S , яка задається формулою:

$$S = \frac{1}{2} E_{\theta} H_{\phi} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\zeta_0 I_0^2 l^2 k^2}{(4\pi r)^2} \cdot \sin^2(\theta), \#(1.2)$$

Тепер було виведено потік через струм у точці живлення I_0 і відношення довжини короткого диполя ℓ до довжини хвилі випромінювання λ . Діаграма спрямованості випромінювання має вигляд $\sin^2(\theta)$ як бачимо, подібна до напівхвильового диполя і лише трохи менш спрямована, ніж у напівхвильового диполя [23].

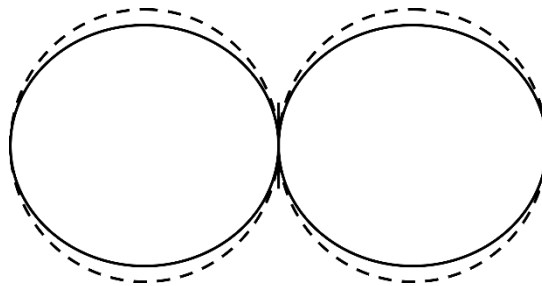


Рисунок 2.5 – Діаграма випромінювання короткого диполя (пунктирна лінія) у порівнянні з напівхвильовим диполем (суцільна лінія)

Використовуючи наведений вище вираз для випромінювання в дальньому полі для заданого струму в точці живлення, ми можемо інтегрувати по всьому прилеглому куту, щоб отримати повну випромінювану потужність.

$$P_{\text{total}} = \frac{\pi}{12} \zeta_0 I_0^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2. \#(1.3)$$

2.1.2 Дипольні антени різної довжини

Фундаментальний резонанс тонкого лінійного провідника виникає на частоті, довжина хвилі у вільному просторі якої вдвічі перевищує довжину провідника, тобто де $\frac{1}{2}$ довжини хвилі. Дипольні антени часто використовуються приблизно на цій частоті і тому називаються напівхвильовими дипольними антенами.

Тонкі лінійні провідники довжиною ℓ фактично є резонансними при будь-якому цілому кратному півхвилі:

$$\ell = n \cdot \frac{\lambda}{2}, \#(1.4)$$

де n - ціле число, а $\lambda = \frac{c}{f}$ - це довжина хвилі.

Для диполя з центральним підведенням, однак, існує велика різниця між непарним і парним значенням n . Диполі з непарним числом півхвиль мають досить низький імпеданс в точці збудження (який є суто резистивним на цій резонансній частоті). Однак ті, що мають парну кількість півхвиль, тобто ціле число довжин хвиль, мають високий імпеданс рушійної точки (хоча і чисто резистивний на цій резонансній частоті). Наприклад, повнохвильова дипольна антена може бути виконана з двох напівхвильових провідників, розміщених кінець в кінець, загальною довжиною приблизно $\ell \approx \lambda$. Це призводить до додаткового підсилення порівняно з півхвильовим диполем приблизно на 2 дБ. Повнохвильові диполі можна використовувати в короткохвильовому мовленні, лише зробивши ефективний діаметр дуже великим і живлячись від високоомної збалансованої лінії.

$\frac{5}{4}$ - хвильова дипольна антена має набагато нижчий, але не чисто резистивний імпеданс у точці введення, що вимагає узгодження мережі з імпедансом лінії передачі. Її коефіцієнт підсилення приблизно на 3 дБ більший, ніж у півхвильового диполя, що є найвищим коефіцієнтом підсилення серед усіх диполів аналогічної довжини. Така антена також відзначається вищою ефективністю випромінювання, завдяки чому вона широко використовується в різних комунікаційних системах [22]. Зокрема, хвильова дипольна антена забезпечує кращу передачу та прийом

сигналів у діапазоні частот, для яких вона оптимізована, що робить її незамінною у сучасних радіотехнічних пристроях.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт підсилення дипольних антен

Довжина, ℓ	коефіцієнт підсилення, (дБі)	Примітки
$\ll 0.5$	1.76	Низька ефективність
0.5	2.15	Найпоширеніший
1.0	4.0	Широкий диполь
1.25	5.2	Найбільший коефіцієнт підсилення
1.5	3.5	Третя гармоніка
2	4.3	Не використовується

Диполі інших довжин не дають переваг і рідко використовуються. Однак додаткові резонанси напівхвильової дипольної антени на непарних частотах, кратних її основній частоті, іноді експлуатуються. Наприклад, радіоаматорські антени, спроектовані як напівхвильові диполі на 7 МГц, можуть також використовуватися як $\frac{3}{2}$ -хвильових диполів на 21 МГц; так само телевізійні антени, що резонують у низькочастотному телевізійному діапазоні (з центром близько 65 МГц), також резонують у високочастотному телевізійному діапазоні (близько 195 МГц).

2.1.3 Напівхвильовий диполь

Півхвильова дипольна антена складається з двох провідників довжиною чверть хвилі, розміщених кінець в кінець на загальній довжині приблизно $\ell = \frac{\lambda}{2}$.

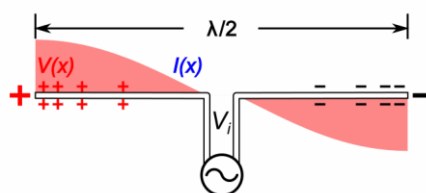


Рисунок 2.6 – Передавальний напівхвильовий диполь, що показує напругу і струм завдяки стоячій хвилі на антені

Розподіл струму має вигляд стоячої хвилі, приблизно синусоїдальний по довжині диполя, з вузлом на кожному кінці і антивузлом (піковий струм) в центрі (точка подачі):

$$I(z) = I_0 \cos(\omega t) \cos(kz), \#1.5$$

У дальньому полі це створює картину випромінювання, електричне поле якої задається:

$$E_\theta = \frac{\zeta_0 I_0}{2\pi r} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \cdot \sin(\omega t - kr), \#1.6$$

Фактор спрямованості $\frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta}$ це майже те саме, що $\sin\theta$ до короткого диполя, що призводить до дуже схожої картини випромінювання, як зазначалося вище.

Чисельне інтегрування випромінюваної потужності $\frac{|E_\theta|^2}{2\zeta_0}$ за всіма прилеглими кутами, як для короткого диполя, дає значення повної потужності випромінюваної диполем зі струмом, що має пікове значення, у вигляді, зазначеному вище.

2.1.4 Симетричний диполь

Симетричний диполь - це напівхвильовий диполь з додатковим паралельним проводом, що з'єднує два його кінці. Якщо додатковий провід має такий самий діаметр і поперечний переріз, як і диполь, генеруються два майже ідентичні випромінювальні струми. Результуюча діаграма спрямованості випромінювання в дальньому полі майже ідентична до описаної вище для однопровідного диполя, але в резонансі його імпеданс в точці введення в чотири рази перевищує радіаційний опір однодротового диполя.

Симетричний "диполь" - це, технічно, складена повнохвильова петльова антена, де петля зігнута на протилежних кінцях і стиснута в два паралельні дроти в плоску лінію. Хоча широка смуга пропускання, високий імпеданс в точці подачі і

висока ефективність є характеристиками, більш схожими на повнохвильову антену, діаграма спрямованості складеного диполя більше нагадує звичайний диполь. Оскільки роботу одиночного напівхвильового диполя легше зрозуміти, як повні петлі, так і складені диполі часто описують як два паралельно з'єднані напівхвильові диполі, з'єднані на кінцях.

Високий імпеданс у точці подачі при резонансі пояснюється тим, що для фіксованої потужності повний струм випромінювання дорівнює подвоєному струму в кожному проводі окремо і, отже, подвоєному струму в точці живлення. Прирівнюючи середню випромінювану потужність до середньої потужності, що підводиться до точки живлення:

$$\frac{1}{2} R_{h.w.} I_0^2 = \frac{1}{2} R_{f.d.} \left(\frac{1}{2} I_0 \right)^2, \#1.5$$

Звідси випливає, що $R_{h.w.}$ це нижній імпеданс точки подачі резонансного напівхвильового диполя.

Тому симетричний диполь добре підходить для збалансованих ліній передачі з опором 300 Ом, таких як двожильний стрічковий кабель. Складений диполь має ширшу смугу пропускання, ніж одинарний диполь. Вони можуть бути використані для трансформації значення вхідного опору диполя в широкому діапазоні коефіцієнтів підсилення шляхом зміни товщини дротяних жил з боку подачі і з боку згину. Замість того, щоб змінювати товщину або відстань між ними, можна додати третій паралельний дріт, щоб збільшити імпеданс антени в 9 разів порівняно з однодротовим диполем, піднявши імпеданс до 658 Ом, що добре підходить для відкритого дротяного кабелю, і ще більше розширити резонансну смугу частот антени. Додатково, така конструкція дозволяє значно розширити резонансну смугу частот антени, що робить її придатною для широкосмугових застосувань. Завдяки цьому хвильова дипольна антена стає універсальним інструментом для різноманітних комунікаційних систем, забезпечуючи стабільне та якісне передавання сигналів у широкому діапазоні частот.

2.1.5 Інші варіанти антен

Існує безліч модифікацій форми дипольної антени, які так чи інакше корисні, але призводять до схожих характеристик випромінювання (низький коефіцієнт підсилення). Це не кажучи вже про численні спрямовані антени, які включають один або кілька дипольних елементів у свою конструкцію як керовані елементи:

- Антена-метелик - це диполь з розширеними трикутними плечима. Така форма дає їй набагато ширшу смугу пропускання, ніж звичайному диполю. Вона широко використовується в телевізійних антенах УВЧ діапазону.
- Каркасний диполь - це схожа модифікація, в якій смуга пропускання збільшується за рахунок використання товстих циліндричних дипольних елементів, виготовлених з «клітки» з дротів (рис.1.4). Вони використовуються в деяких широкосмугових антенних решітках в середньохвильовому і короткохвильовому діапазонах для таких застосувань, як надгоризонтний радар і радіотелескопи.



Рисунок 2.7 – Каркасні дипольні антени в українському радіотелескопі UTR-2

- Рупорна антена - це напівхвильовий диполь, зігнутий в коло для майже рівномірної діаграми спрямованості в площині кола. Коли коло гало розташоване горизонтально, воно виробляє горизонтально поляризоване випромінювання в майже всеспрямованій діаграмі спрямованості з невеликими втратами потужності в zenіті, порівняно з прямим горизонтальним

диполем. На практиці її класифікують або як зігнутий диполь, або як петльову антену, залежно від уподобань автора.

- Турнікетна антена складається з двох диполів, схрещених під прямим кутом, і системи живлення, яка вносить чвертьхвильову різницю фаз між струмами вздовж них. Завдяки такій геометрії два диполі не взаємодіють електрично, але їхні поля складаються в дальньому полі, створюючи діаграму спрямованості, досить близьку до ізотропної, з горизонтальною поляризацією в площині елементів і круговою або еліптичною поляризацією під іншими кутами. Турнікетні антени можна скласти в стек і подавати на них фазовий сигнал, щоб створити всеспрямовану широкосмгову антенну решітку, або фазовану, щоб створити торцеву антенну решітку з круговою поляризацією.
- Антена-метелик - це турнікетна антена, лінійні елементи якої розширені, як у антени-метелика, знову ж таки з метою розширення її резонансної частоти і, таким чином, використання в ширшій смузі частот без переналаштування. При складанні в масив випромінювання є всеспрямованим, горизонтально поляризованим і з підвищеним коефіцієнтом підсилення на малих висотах, що робить її ідеальною для телевізійного мовлення.
- V-подібна (або V-подібна) антена - це диполь з вигином посередині, тому його плечі розташовані під кутом.
- Квадрантна антена - це V-подібна антена з незвичайною загальною довжиною повної довжини хвилі, з двома напівхвильовими горизонтальними елементами, що перетинаються під прямим кутом у місці подачі. Квадрантні антени створюють переважно горизонтальну поляризацію при низьких і проміжних кутах підйому і мають майже всеспрямовану діаграму спрямованості.

В одній з реалізацій використовуються елементи каркаса, товщина отриманих елементів знижує високий імпеданс точки руху повнохвильового диполя до значення, яке забезпечує розумне узгодження з відкритими дротяними лініями і

збільшує смугу пропускання (в термінах SWR) до повної октави. Вони використовуються для передачі у високочастотному діапазоні.

- Антена g5rv - це дипольна антена, що живиться непрямым шляхом, через ретельно підібраний відрізок подвійного кабелю з опором 300 або 450 Ом, який діє як мережа узгодження імпедансу для підключення (через балун) до стандартної коаксіальної лінії передачі з опором 50 Ом.
- Похила антена - це похила вертикальна дипольна антена, прикріплена до верхівки однієї вежі. Елемент може мати центральне або торцеве живлення як незбалансована монопольна антена від лінії передачі на вершині вежі, в цьому випадку «заземлення» монополя краще розглядати як другий елемент, що складається з вежі та / або екрану лінії передачі.
- Перевернута V-подібна антена також підтримується за допомогою однієї вежі, але є збалансованою антеною з двома симетричними елементами, розташованими під кутом до землі. Таким чином, це напівхвильовий диполь з вигином посередині. Як і у випадку з похилою антеною, практична перевага полягає в тому, що вона дозволяє підняти антену, але потребує лише однієї вежі.
- Антена AS-2259 - це перевернута V-подібна дипольна антена, яка використовується для місцевого зв'язку в діапазоні майже вертикального падіння Skywave (NVIS).

2.1.6 Вертикальні (монопольні) антени

«Вертикальна», «марконіанська» або монопольна антена - це одноелементна антена, яка зазвичай живиться знизу (з екранною стороною її несиметричної лінії передачі, з'єднаної з землею). Вона поводить себе по суті так само, як половина дипольної антени. Земля (або площина заземлення) вважається провідною поверхнею, яка працює як рефлектор. Вертикальні струми у відбитому зображенні мають той самий напрямок (тобто не відбиваються від землі) і фазу, що і струми в реальній антені. Провідник і його зображення разом діють як диполь у верхній

половині простору. Як і диполь, для досягнення резонансу (резистивного імпедансу в точці подачі) провідник повинен мати висоту близько чверті довжини хвилі (як і кожен провідник у напівхвильовому диполі).

У цій верхній частині простору випромінюване поле має таку саму амплітуду, що й поле, випромінюване аналогічним диполем, живленим тим самим струмом. Тому загальна випромінювана потужність вдвічі менша за потужність випромінювання диполя, який живиться тим самим струмом. Оскільки струм однаковий, опір випромінювання (дійсна частина послідовного імпедансу) дорівнюватиме половині послідовного імпедансу порівнянного диполя. Отже, чвертьхвильовий монополь має імпеданс $\frac{74+j43}{2} = 36 + j21\Omega$. Інший спосіб побачити це полягає в тому, що справжній диполь, який отримує струм I , має напруги на своїх затискачах $+V$ і $-V$, для імпедансу між затискачами $2 \frac{V}{I}$, тоді як порівняна вертикальна антена має струм I , але прикладену напругу лише V .

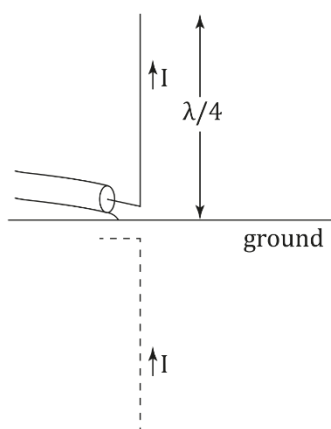


Рисунок 2.7 – Диполь, який випромінює тільки у верхній половині простору

Оскільки поля над землею такі ж, як і для диполя, але застосовується лише половина потужності, коефіцієнт підсилення подвоюється до 5,14 дБі. Це не є фактичною перевагою, оскільки на практиці диполь також відбиває половину своєї потужності від землі, що (залежно від висоти антени і кута нахилу) може посилити прямий сигнал. Вертикальна поляризація монополя (як і для вертикально оріє-

нтованого диполя) вигідна на малих кутах над рівнем моря, де відбиття від землі поєднується з прямою хвилею приблизно у фазі.

Земля діє як площа заземлення, але вона може бути поганим провідником, що призводить до втрат. Її провідність можна покращити (за додаткову плату), проклавши мідну сітку. Якщо заземлення відсутнє (наприклад, у транспортному засобі), інші металеві поверхні можуть слугувати площиною заземлення (як правило, дах автомобіля). Крім того, радіальні дроти, розміщені біля основи антени, можуть утворювати площину заземлення. Для метрового та дециметрового діапазонів випромінюючі елементи і елементи площини заземлення можуть бути виготовлені з жорстких стрижнів або трубок. Використання такої штучної площини заземлення дозволяє встановлювати всю антену і «землю» на довільній висоті. В одній з поширених модифікацій радіуси, що утворюють площину заземлення, нахилені вниз, що призводить до підвищення імпедансу в точці подачі приблизно до 50 Ом, що відповідає звичайному коаксіальному кабелю.

2.2 Дипольні характеристики антени

Імпеданс диполів різної довжини. Опір точки живлення дипольної антени залежить від її електричної довжини та положення точки живлення. Таким чином, диполь, як правило, буде працювати оптимально тільки в досить вузькій смузі пропускання, за межами якої його імпеданс стане поганим відповідачем передавача або приймача (і лінії передачі). Справжні (резистивні) та уявні (реактивні) компоненти цього імпедансу як функція електричної довжини показані на супровідному графіку. Зміни в резистивній складовій вказують на ефективність передачі енергії через антену, тоді як зміни в реактивній складовій вказують на здатність антени зберігати енергію в електричних і магнітних полях.

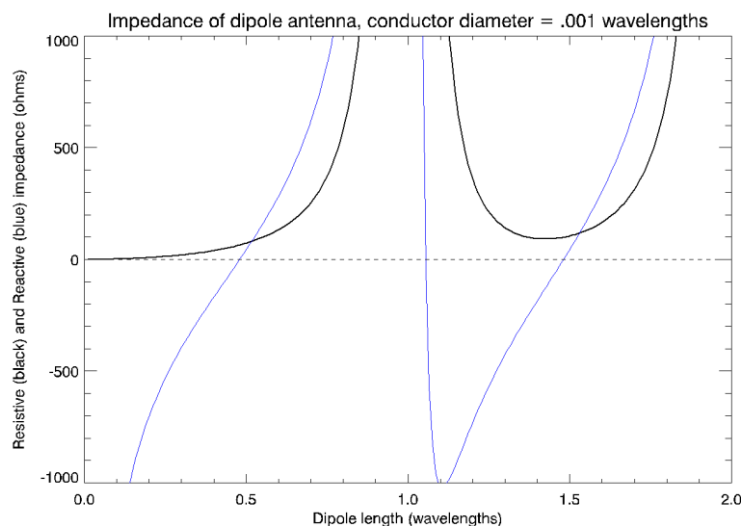


Рисунок 2.8 – Резистивна (чорна) і реактивна (синя) частини опору дипольної точки живлення від загальної довжини в довжинах хвиль, припускаючи, що діаметр провідника становить 0,001 довжини хвилі

Диполі, які значно менші за половину довжини хвилі сигналу, називаються короткими диполями. Вони мають дуже низький опір випромінюванню (і високий ємнісний реактивний опір), що робить їх неефективними антенами. Більша частина струму передавача розсіюється у вигляді тепла через кінцевий опір провідників, який перевищує опір випромінювання. Однак вони, тим не менш, можуть бути практичними приймальними антенами для більших довжин хвиль.

Диполі, довжина яких становить приблизно половину довжини хвилі сигналу, називаються напівхвильовими диполями і широко використовуються як такі або як основа для конструкцій похідних антен. Вони мають такий опір випромінювання, який є набагато більшим, ближчим до характеристичного опору доступних ліній електропередачі, і зазвичай набагато більшим, ніж опір провідників, так що їх ефективність наближається до 100%. У загальній радіотехніці термін диполь, якщо він не пояснюється додатково, означає напівхвильовий диполь із центральним живленням.

Справжній напівхвильовий диполь становить половину довжини хвилі λ . Такий диполь має імпеданс точки живлення, що складається з опору 73 Ом і реактивного опору +43 Ом, таким чином представляючи невеликий індуктивний опір.

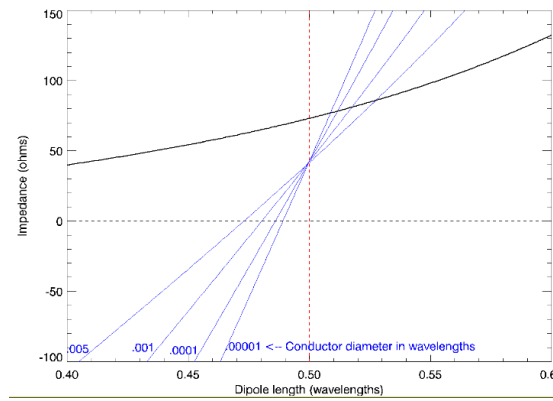


Рисунок 2.9 – Імпеданс точки живлення напівхвильових диполів проти електричної довжини

Щоб скасувати цей реактивний опір і створити чистий опір лінії живлення, елемент ділять на коефіцієнт k :

$$l = \frac{1}{2} k \lambda = \frac{1}{2} k \frac{c}{f}, \#1.6$$

де λ – довжина хвилі вільного простору, c – швидкість світла у вільному просторі, f – частота. Коефіцієнт регулювання k , який спричиняє усунення реактивного опору точки живлення, залежить від діаметра провідника, як показано на рис. 2.10.

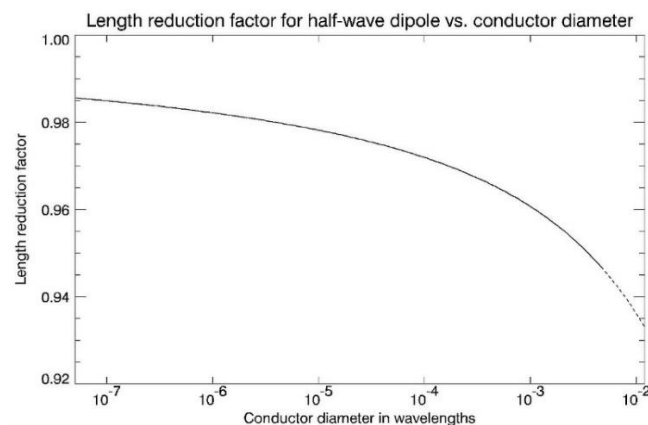


Рисунок 2.10 – Коефіцієнт зменшення довжини для напівхвильового диполя для досягнення електричного резонансу (чисто резистивний імпеданс точки живлення)

Відносний масштабний розмір k коливається від приблизно 0,98 для тонких дротів (діаметр, 0,00001 хвилі) до приблизно 0,94 для товстих провідників (діаметр, 0,008 хвилі). Це пояснюється тим, що вплив довжини антени на реактивний опір набагато більший для тонших провідників, тому потрібне менше відхилення від точної половини довжини хвилі, щоб скасувати індуктивний опір 43 Ом, який вона має, а саме $\frac{1}{2}\lambda$. З тієї ж причини антени з більш товстими провідниками мають ширшу робочу смугу, в якій вони досягають практичного коефіцієнта стоячої хвилі, який погіршується будь-яким залишковим реактивним опором.

Дипольні антени, довжина яких приблизно дорівнює будь-якому непарному кратному $1/2\lambda$ також є резонансними, створюючи невеликий реактивний опір або взагалі не створюючи його (який можна усунути шляхом невеликого регулювання довжини). Однак вони використовуються рідко. Один розмір, який є набагато ефективнішим випромінювачем як з точки зору вихідної потужності Вт, так і в напрямку випромінювання, - це диполь довжиною $5/4$ хвилі. Не будучи поруч $3/2$ хвилі, опір цієї антени має великий (негативний) реактивний опір і може використовуватися лише з мережею узгодження індуктивного опору (котушка навантаження з відводами або так званий антенний тюнер). Це бажана довжина, тому що така антена має найвищий коефіцієнт посилення для будь-якого диполя, який не є набагато довшим.

Діаграма спрямованості та підсилення. Диполь є всенаправленим у площині, перпендикулярній до осі дроту, з випромінюванням, що падає до нуля на осі (від кінців антени). У напівхвильовому диполі випромінювання є максимальним перпендикулярно до антени, зменшуючись як $(\sin\theta)^2$ до нуля на осі. Його діаграма спрямованості в трьох вимірах (рис. 1.9) буде зображена приблизно як тороїд (у формі бублика), симетричний відносно провідника.

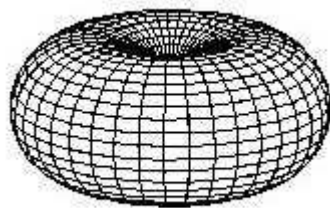


Рисунок 2.11 – Тривимірна діаграма спрямованості вертикальної півхвильової дипольної антени

При вертикальному встановленні це призводить до максимального випромінювання в горизонтальних напрямках. При горизонтальній установці випромінювання має піки під прямим кутом (90°) до провідника з нульовими значеннями в напрямку диполя.

Нехтуючи електричною неефективністю, посилення антени дорівнює посиленню спрямованості, яке становить 1,5 дБд (1,76 дБі) для короткого диполя, збільшуючись до 1,64 дБд (2,15 дБі) для півхвильового диполя. Для $5/4$ хвильового диполя, посилення додатково збільшується приблизно до 5,2 дБі, що робить цю довжину бажаною з цієї причини, навіть якщо антена тоді знаходиться поза резонансом. Довші диполі мають багатопелюсткові діаграми спрямованості з гіршим посиленням (якщо вони не набагато довші) навіть уздовж найсильнішої пелюстки.

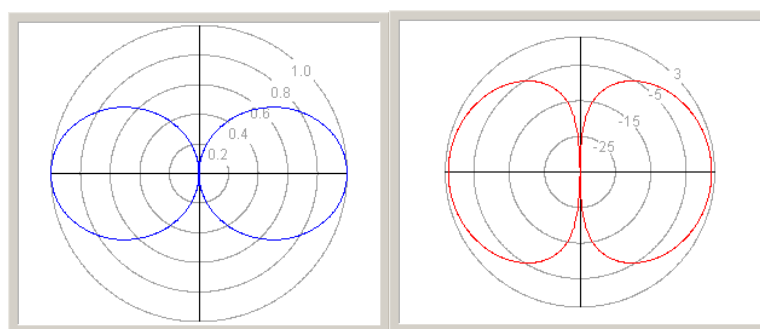


Рисунок 2.12 – Діаграма спрямованості вертикального напівхвильового диполя: вертикальний розріз (зліва) в лінійному масштабі, (зправа) в децибелах ізотропно (дБі)

Інші вдосконалення диполя (наприклад, включення кутового рефлектора або масиву диполів) можна розглянути, якщо потрібна більша спрямованість. Такі конструкції антен, хоча й засновані на напівхвильовому диполі, зазвичай отримують власні назви.

Живлення дипольної антени. В ідеалі напівхвильовий диполь слід живити за допомогою збалансованої лінії передачі, що відповідає типовому вхідному опору 65–70 Ом. Подвійний провід із подібним імпедансом доступний, але використовується рідко та не підходить до збалансованих антенних клем більшості радіо- та телевізійних приймачів. Набагато більш поширеним є використання звичайного подвійного дроту 300 Ом у поєднанні зі складеним диполем. Імпеданс рушійної точки напівхвильового складеного диполя в 4 рази більший, ніж у простого напівхвильового диполя, таким чином, він майже відповідає цьому характерному опору 300 Ом. Більшість тюнерів FM-діапазонів мовлення та старіших аналогових телевізорів включають збалансовані вхідні роз'єми антени 300 Ом. Однак здвоєний провід має недолік, оскільки він створює електричні перешкоди будь-яким іншим провідникам поблизу (включаючи землю). При використанні для передачі, слід бути обережним, щоб не розміщувати його поблизу інших провідників.

Багато типів коаксіального кабелю мають характеристичний опір 75 Ом, який в іншому випадку був би хорошим відповідником для напівхвильового диполя. Однак коаксіальний кабель має односторонню лінію, тоді як диполь із центральним живленням передбачає збалансовану лінію (наприклад, подвійний кабель). За допомогою симетрії можна побачити, що клеми диполя мають однакову, але протилежну напругу, тоді як у коаксіального кабелю один провідник заземлений. Використання коаксіального кабелю призводить до незбалансованої лінії, у якій струми вздовж двох провідників лінії передачі більше не є рівними та протилежними. Оскільки тоді є чистий струм уздовж лінії передачі, лінія передачі сама стає антеною з непередбачуваними результатами (оскільки це залежить від шляху лінії передачі). Це, як правило, змінює призначену діаграму спрямованості антени та змінює імпеданс передавача чи приймача.

Для використання коаксіального кабелю з дипольною антеною потрібен балун. Балун передає потужність між одностороннім коаксіальним кабелем і симетричною антеною, іноді з додатковою зміною імпедансу. Балун може бути реалізований як трансформатор, який також дозволяє трансформувати імпеданс. Зазвичай він намотаний на феритовий тороїдальний сердечник. Матеріал сердечника тороїда повинен відповідати частоті використання, а в передавальній антені він має бути достатнього розміру, щоб уникнути насичення.

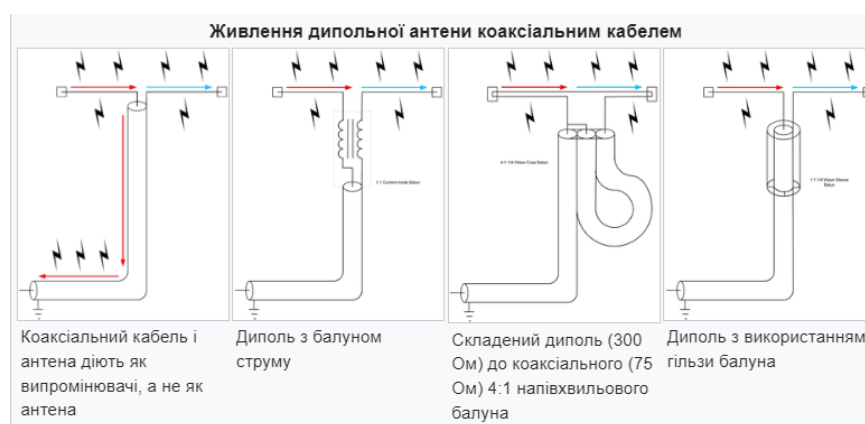


Рисунок 2.13 – Живлення дипольної антени коаксіальним кабелем

Балун струму. Балун струму використовує трансформатор, намотаний на тороїд або стрижень із магнітного матеріалу, наприклад фериту. Весь струм, який спостерігався на вході, надходить на один термінал симетричної антени. Він утворює балун, гальмуючи синфазний струм. Матеріал не є критичним для 1:1, оскільки немає трансформаторної дії, застосованої до бажаного диференціального струму. Пов'язана конструкція включає два трансформатори та включає перетворення імпедансу 1:4.

Коаксіальний балун. Коаксіальний балун є економічно ефективним методом усунення випромінювання фідера, але обмежений вузьким набором робочих частот.

Одним із простих способів зробити балун є використання довжини коаксіального кабелю, що дорівнює половині довжини хвилі. Внутрішній стрижень кабелю з'єднаний на кожному кінці з одним із збалансованих з'єднань для фідера

або диполя. Одну з цих клем слід під'єднати до внутрішнього сердечника коаксіального фідера. Всі три коси потрібно з'єднати разом. Потім утворюється балун 4:1, який правильно працює лише у вузькому діапазоні частот.

Гільза балун. На УКХ- частотах також можна побудувати балун для видалення випромінювання фідера.

Інша вузькосмугова конструкція полягає у використанні $1/4 \lambda$ довжини металевої труби. Коаксіальний кабель укладається всередину труби, на одному кінці обмотка підключена до труби, а на іншому кінці труби не з'єднана. Збалансований кінець цього балуна знаходиться на іншому кінці, де немає з'єднання з трубою. Тоді $1/4 \lambda$ провідника діє як трансформатор, перетворюючи нульовий опір на короткому з'єднанні з обплетенням у нескінченний опір на відкритому кінці. Цей нескінченний опір на відкритому кінці труби запобігає надходженню струму в зовнішній коаксіальний кабель, утворений зовнішньою частиною внутрішнього екрану коаксіального кабелю та трубою, змушуючи струм залишатися у внутрішньому коаксіальному кабелі. Ця конструкція балуна непрактична для низьких частот через велику довжину труби, яка знадобиться.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИПОЛЬНОЇ АНТЕНИ

3.1 Вибір методів та засобів моделювання

Ефективність роботи дипольної антени значною мірою залежить від її конструктивних параметрів, таких як форма та розміри. Тому дослідження впливу цих параметрів на характеристики випромінювання є актуальним завданням для інженерів та науковців.

Метою даного дослідження є моделювання дипольної антени за допомогою програмного комплексу Ansys HFSS (High Frequency Structure Simulator), аналіз отриманих результатів та визначення оптимальних параметрів антени для забезпечення максимальної ефективності випромінювання. Ansys HFSS є потужним інструментом для моделювання та аналізу електромагнітних полів, який дозволяє проводити детальне дослідження антенних характеристик.

У цьому дослідженні буде розглянуто теоретичні основи роботи дипольної антени, описано методологію моделювання в Ansys HFSS, представлено результати числових симуляцій для різних форм та розмірів дипольної антени, а також проведено аналіз отриманих даних. Основна увага приділяється дослідженню таких параметрів, як діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення та інші ключові характеристики випромінювання.

Результати цього дослідження допоможуть глибше зрозуміти вплив конструктивних параметрів дипольної антени на її ефективність та можуть бути використані для оптимізації антенних систем у практичних застосуваннях.

3.2 Моделювання дипольної антени за допомогою програми Ansys HFSS

На рис.3.1 показано вікно вибору матеріалів у програмі Ansys HFSS. У цьому вікні користувач може обирати матеріали для моделювання електромагнітних структур.

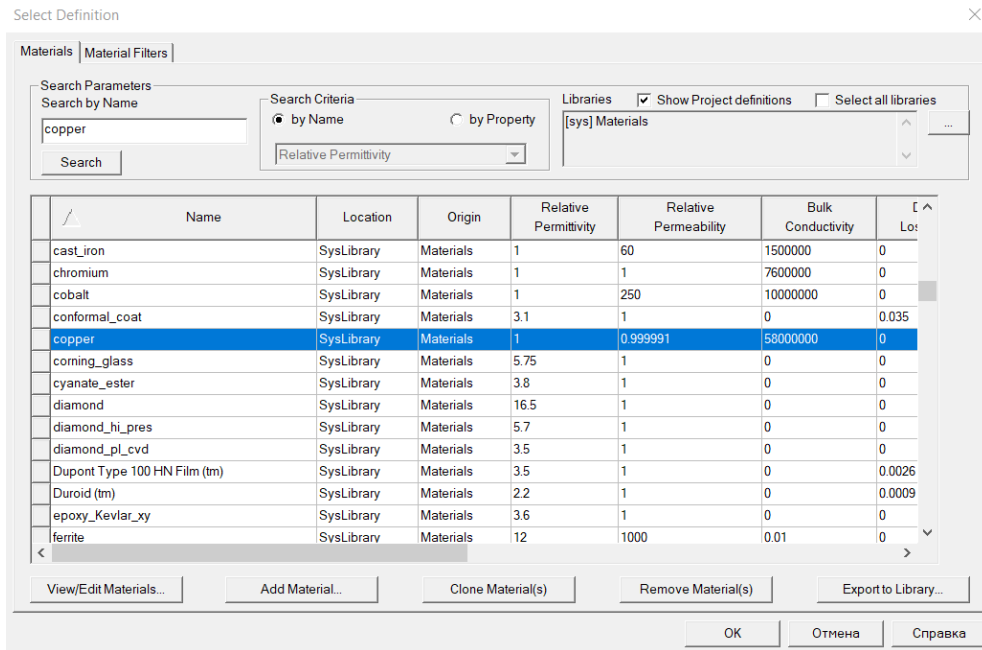


Рисунок 3.1 – Список доступних матеріалів

Основний стрижень дипольної антени складається з двох концентричних стержнів і центрального провідного стержня. Для моделювання цього компонента в програмному комплексі Ansys HFSS необхідно створити зовнішній стержень шляхом побудови двох концентричних циліндрів та відділення внутрішнього циліндра від зовнішнього.

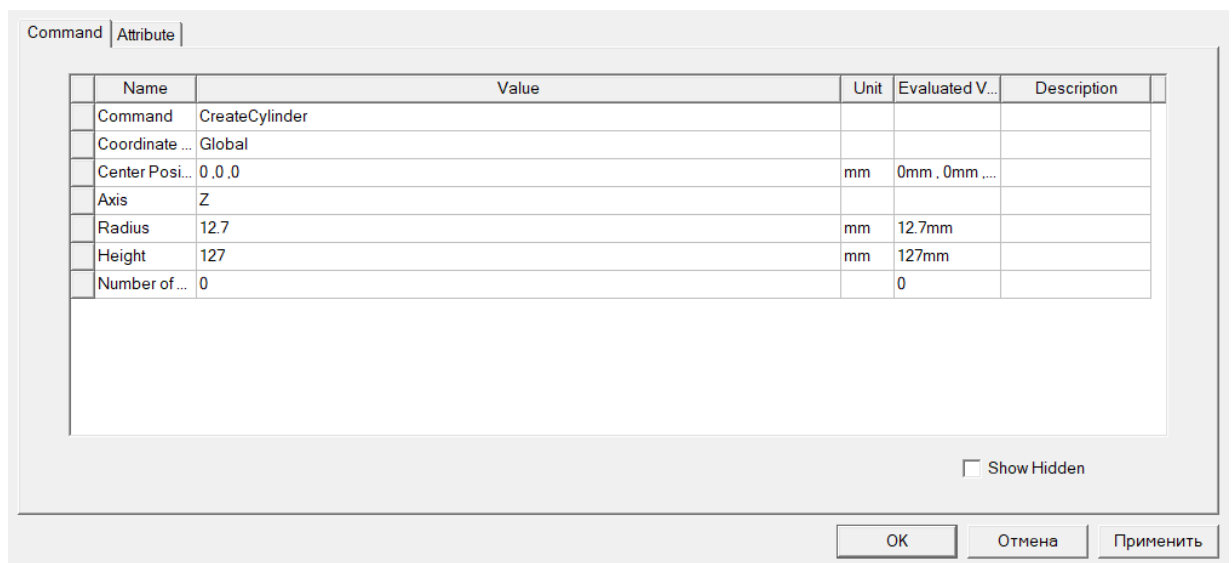


Рисунок 3.2 – Діалогове вікно для задання зовнішнього радіусу та висоти для зовнішньої сторони стержня

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description
Command	CreateCylinder			
Coordinate ...	Global			
Center Posi...	0,0,0	mm	0mm, 0mm, ...	
Axis	Z			
Radius	11	mm	11mm	
Height	127	mm	127mm	
Number of ...	0		0	

☐ Show Hidden

OK Отмена Применить

Рисунок 3.3 – Діалогове вікно для задання внутрішнього радіусу та висоти для зовнішньої сторони стержня

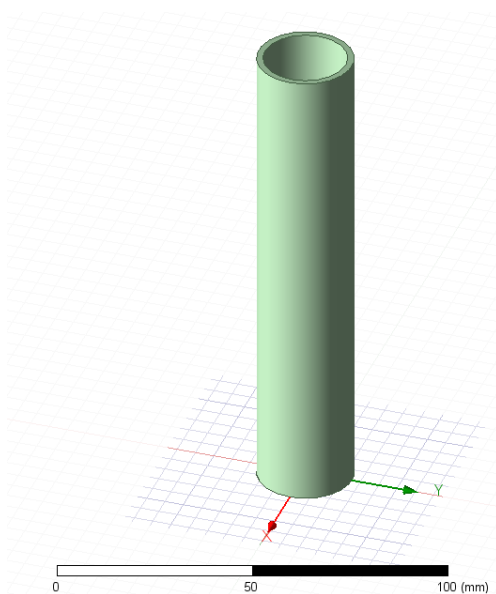


Рисунок 3.4 – Вигляд зовнішньої сторони стержня

Дипольна антена має двостінну структуру, що включає зовнішній і внутрішній стержні. В рамках цієї процедури створено менший внутрішній стержень, розташований всередині зовнішнього стержня.

Command

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description
Command	CreateCylinder			
Coordinate ...	Global			
Center Posi...	0,0,0	in	0in , 0in , 0in	
Axis	Z			
Radius	7.8	mm	7.8mm	
Height	127	mm	127mm	
Number of ...	0		0	

☐ Show Hidden

OK Отмена Применить

Рисунок 3.5 – Діалогове вікно для задання зовнішнього радіусу та висоти для внутрішньої сторони стержня

Command

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description
Command	CreateCylinder			
Coordinate ...	Global			
Center Posi...	0,0,0	in	0in , 0in , 0in	
Axis	Z			
Radius	9.4	mm	9.4mm	
Height	127	mm	127mm	
Number of ...	0		0	

☐ Show Hidden

OK Отмена Применить

Рисунок 3.6 – Діалогове вікно для задання внутрішнього радіусу та висоти для внутрішньої сторони стержня

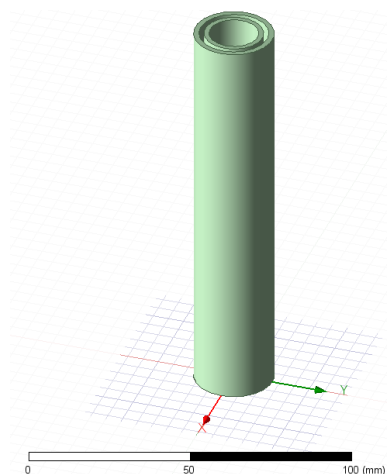


Рисунок 3.7 – Модель із внутрішньою та зовнішньою стороною стержня

Плечі дипольної антени є ключовими елементами, які випромінюють електромагнітні хвилі. Вони складаються з двох симетричних частин, розташованих по обидві сторони від центрального провідного стержня.

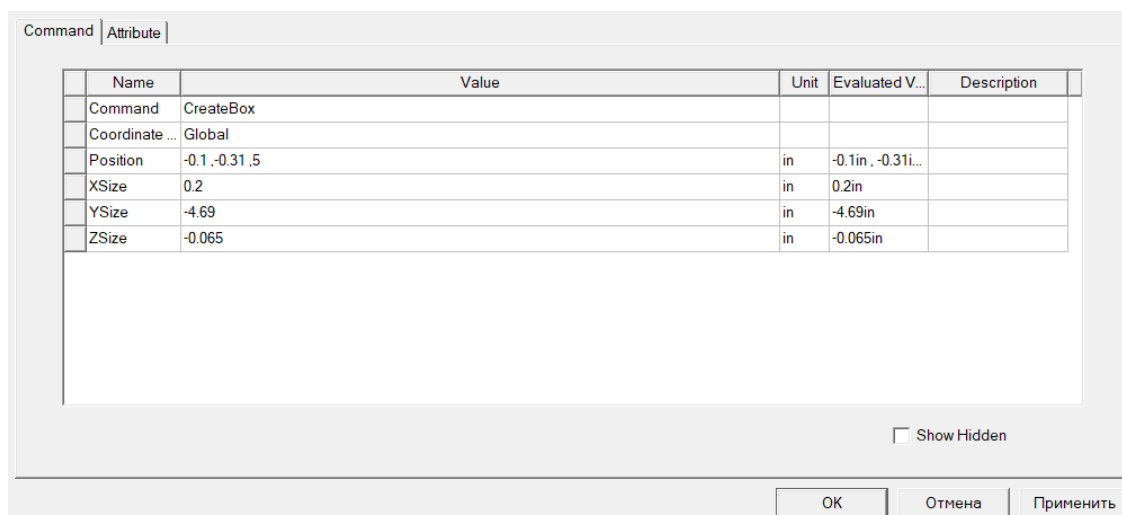


Рисунок 3.8 – Діалогове вікно для задання координат для першого плеча

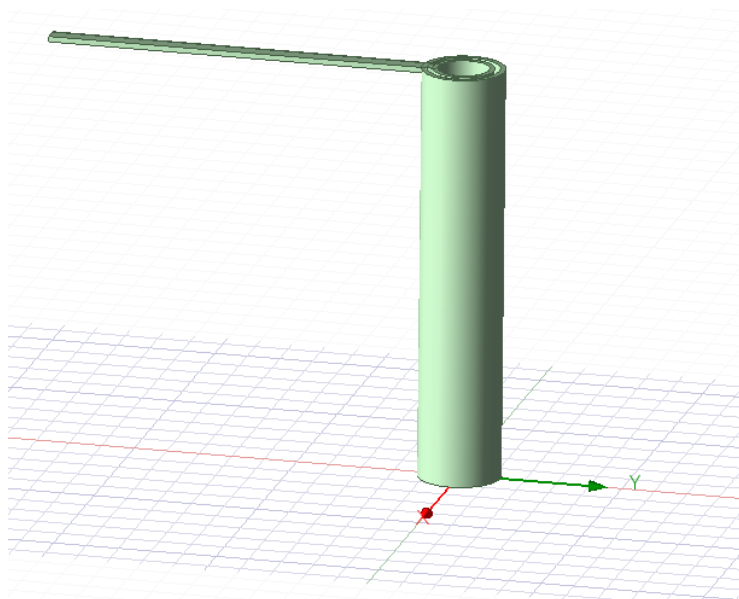


Рисунок 3.9 – Перше плече стержня

Після створення плеча дипольної антени необхідно здійснити процес їх об'єднання з головним стержнем, щоб утворити єдину антенну конструкцію.

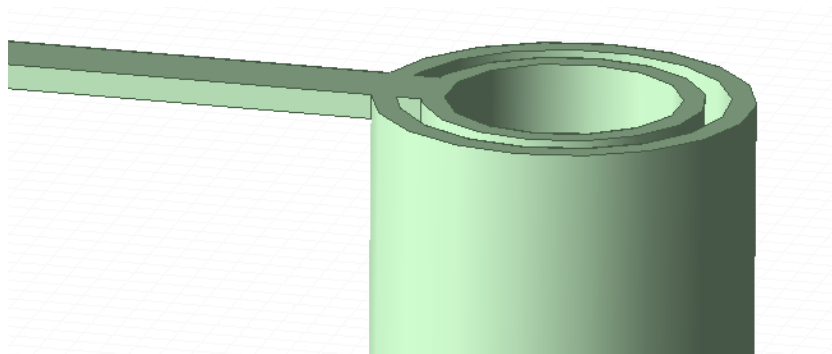


Рисунок 3.10 – Вигляд з'єднання елементів

Елементи об'єднано в один, оскільки в місцях перетину об'єктів відсутні короткі розриви між зовнішнім та внутрішнім діаметром стержня.

Після створення першого плеча дипольної антени необхідно реалізувати процес моделювання центрального провідного стержня, який є центральним елементом антенної системи.

Name	Value	Unit	Evaluated V...	Description
Command	CreateCylinder			
Coordinate ...	Global			
Center Posi...	0,0,0	mm	0mm, 0mm ,...	
Axis	Z			
Radius	2.54	mm	2.54mm	
Height	129.5	mm	129.5mm	
Number of ...	0		0	

☐ Show Hidden

OK Отмена Применить

Рисунок 3.11 – Параметри центрального стержня

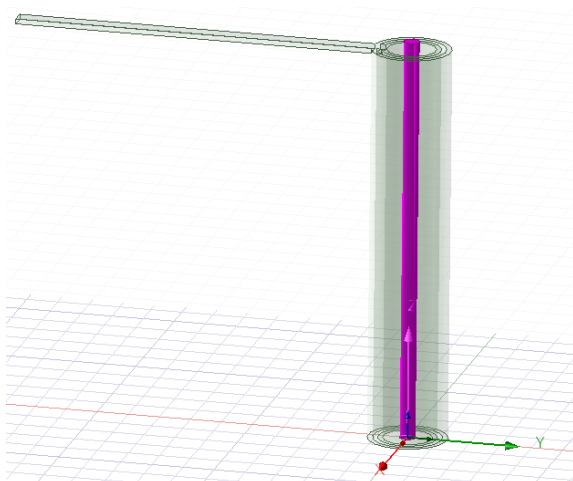


Рисунок 3.12 – Вигляд центрального стержня всередині

Після створення першого плеча та центрального стержня дипольної антени необхідно здійснити процес моделювання другого плеча, щоб утворити та об'єднати конструкцію дипольної антени.

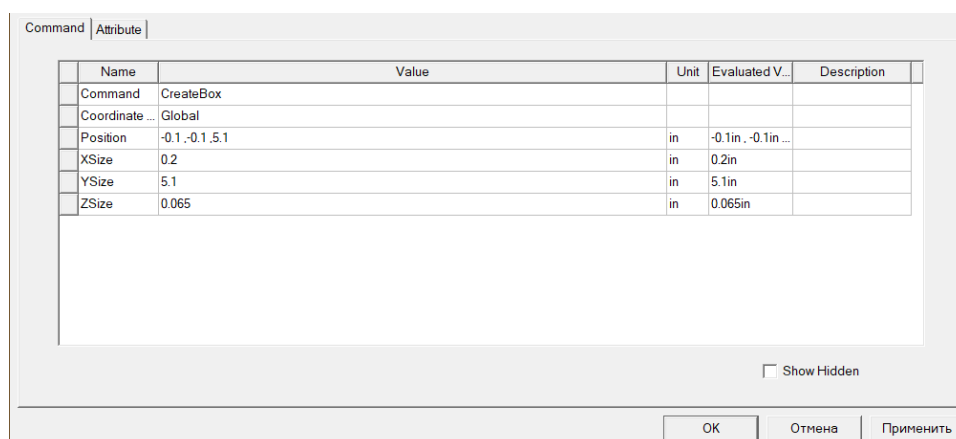


Рисунок 3.13 – Діалогове вікно для задання координат для другого плеча

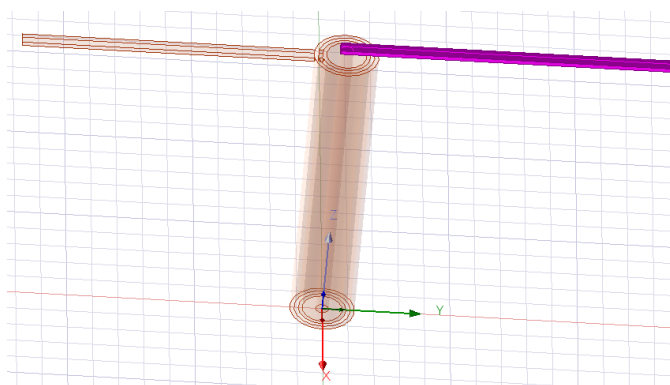


Рисунок 3.14 – Друге плече для стержня

Після створення конструкції дипольної антени необхідно реалізувати процес застосування мідного покриття, щоб врахувати ефекти провідності матеріалу та покращити характеристики антени.

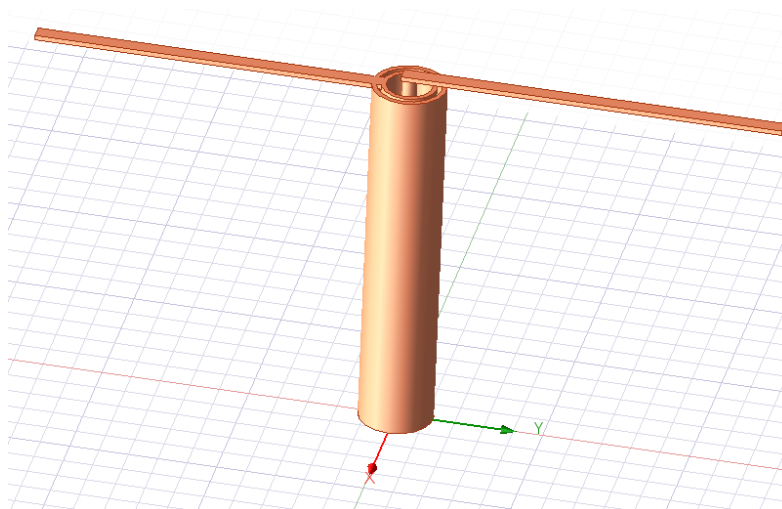


Рисунок 3.15 – Вигляд стержня з двома плечами

Для повної конструкції дипольної антени залишилось приєднати заземлення.

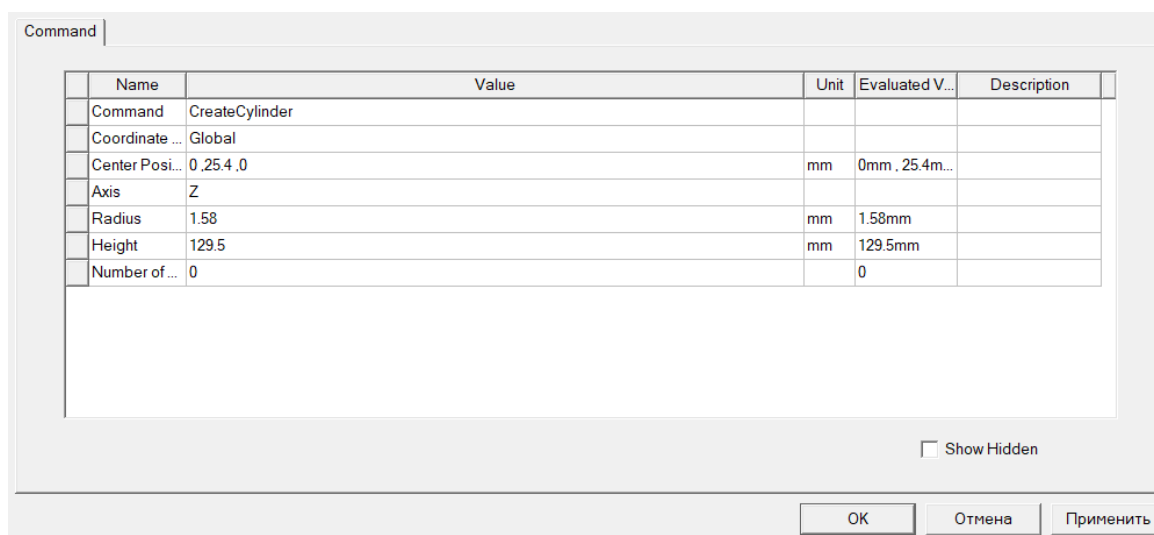


Рисунок 3.16 – Властивості виводу заземлення

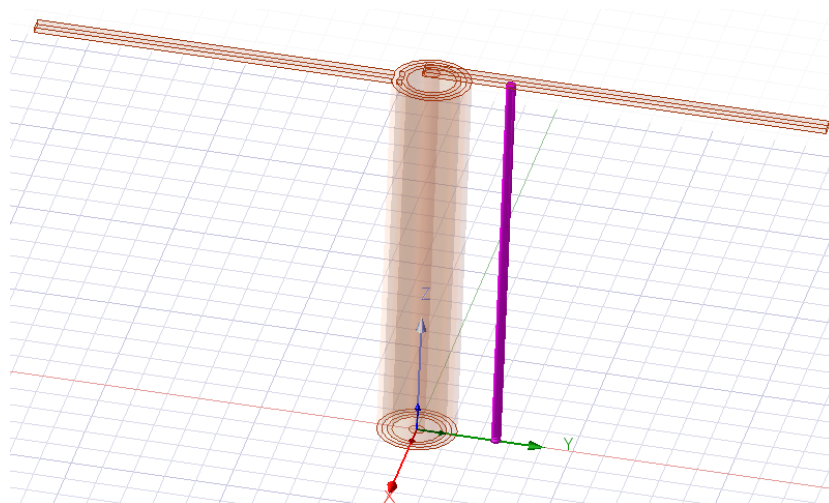


Рисунок 3.17 – Вигляд заземлення у загальній структурі

Після створення окремих моделей другого плеча, центрального стержня та заземлення, наступним кроком є їх об'єднання для формування єдиної антенної структури.

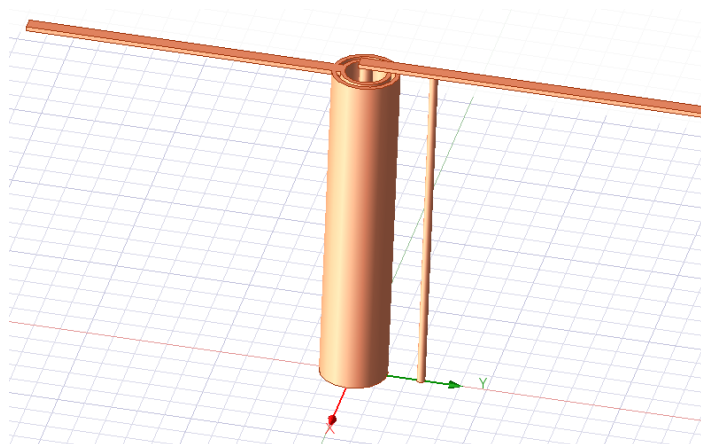


Рисунок 3.18 – Вигляд стержня після об'єднання другого плеча, заземлення та центрального стержня

Процес створення кола порту є важливим етапом у моделюванні дипольної антени, оскільки це дозволяє забезпечити правильне збудження антенної системи.

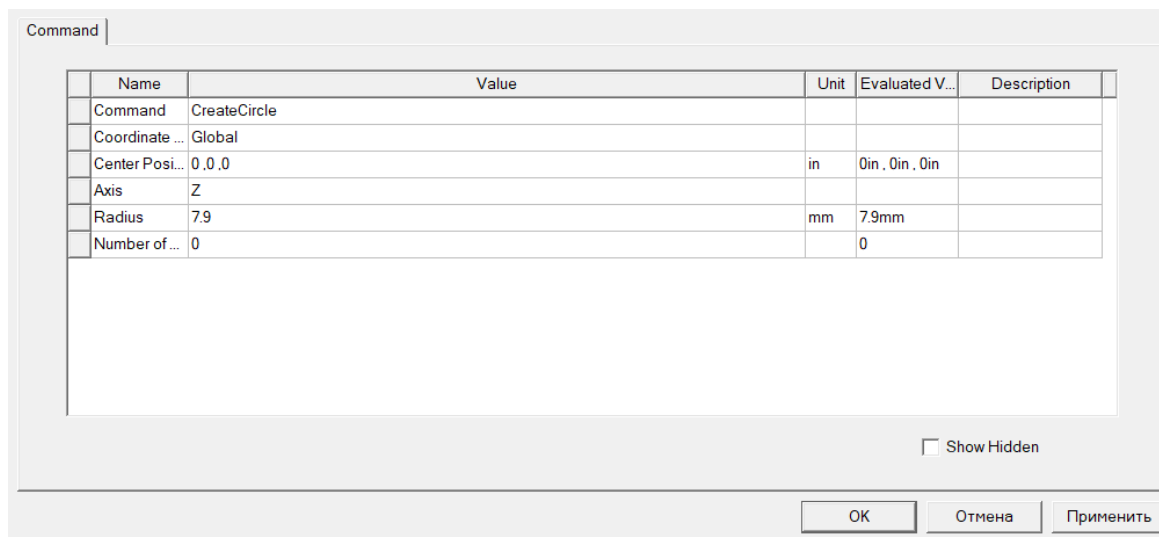


Рисунок 3.19 – Діалогове вікно для задання параметрів порту

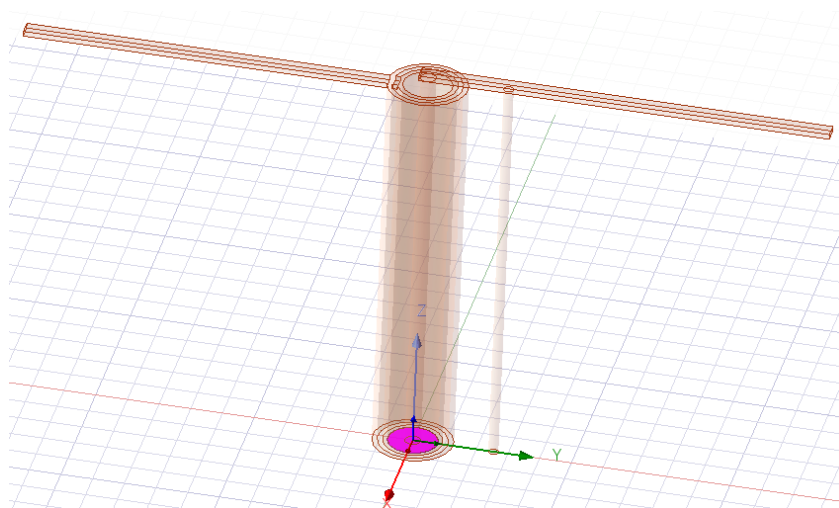


Рисунок 3.20 – Вигляд кола порту в загальній структурі

Відкрита область - це об'єм, що оточує відкриту модель (наприклад, антену), в якому обчислюються ближні поля. Зовнішні поверхні області мають застосовані границі випромінювання, FE-BI або PML, які поглинають виходячі електромагнітні хвилі, тим самим завершуючи модель. Матеріал за замовчуванням для відкритої області - це вакуум, що також підходить для визначення поведінки полів у повітрі (різниця у поведінці полів між повітрям і вакуумом незначна).

Створення відкритої області є важливим етапом у моделюванні дипольної антени, оскільки це дозволяє точно відобразити її поведінку в реальних умовах. Перш за все, необхідно встановити розміри відкритої області, яка повинна бути

достатньо великою для мінімізації впливу граничних умов на результати моделювання. Важливо врахувати характеристики середовища, в якому буде працювати антена, зокрема тип і властивості навколишнього простору.

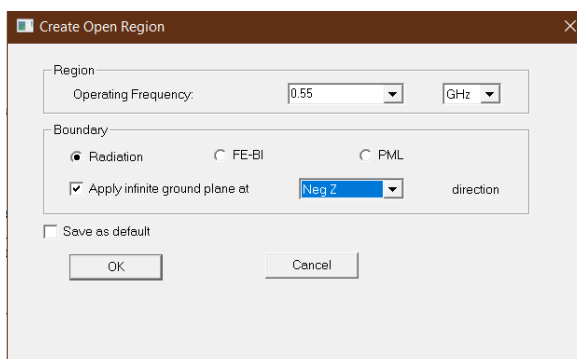


Рисунок 3.21 – Діалогове вікно відкритої області

Далі створюється геометрія відкритої області за допомогою відповідного програмного забезпечення, при цьому антена розміщується в центрі області для забезпечення симетричного поширення електромагнітних хвиль. Наступним кроком є налаштування граничних умов на межах відкритої області, які моделюють нескінченний простір. Це може включати використання умов випромінювання або поглинаючих меж. Важливо врахувати взаємодію між відкритою областю та іншими елементами моделі для забезпечення коректного відображення фізичних процесів.

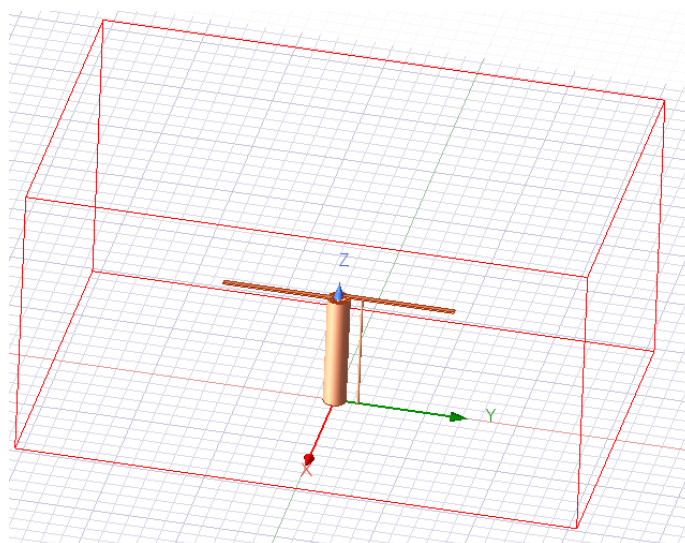


Рисунок 3.22 – Вигляд відкритої області в загальній структурі

Наступним етапом є призначення збудження хвильового порту попередньо заданому колу порту. Це важливий крок для забезпечення правильного збудження антенної системи та точності моделювання.

Спочатку необхідно визначити параметри збудження, включаючи частоту, амплітуду та фазу сигналу, що подається на порт. Після цього, за допомогою програмного забезпечення, здійснюється призначення збудження хвильового порту на попередньо створене коло порту. Це передбачає налаштування електричних параметрів порту та його інтеграцію у загальну модель антени.

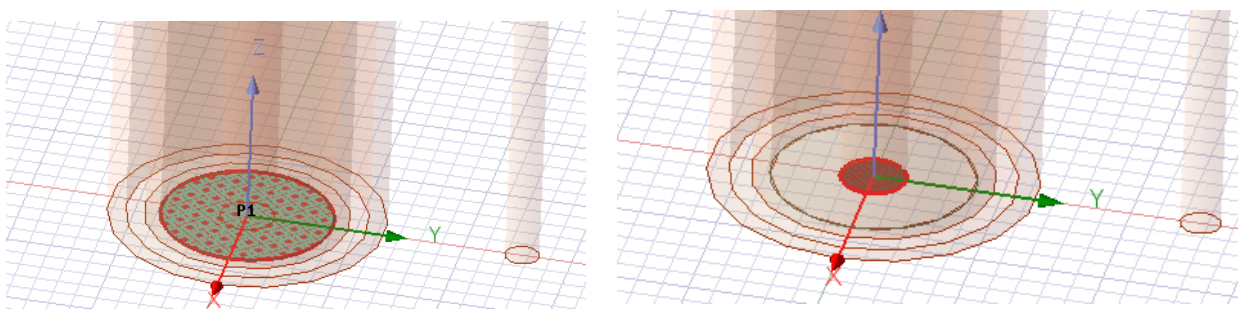


Рисунок 3.23 – Візуалізація хвильового порту

Візуалізація дозволяє детально проаналізувати розподіл електромагнітного поля в області порту та оцінити його вплив на характеристики антени. Це важливий етап, що допомагає виявити можливі проблеми зі збудженням або конструкцією антени, а також забезпечити оптимальне налаштування всіх компонентів.

Наступним етапом є перевірка налаштувань випромінювання дипольної антени. Це важливий крок, який дозволяє забезпечити відповідність моделі антенним характеристикам, визначеним у вимогах дослідження.

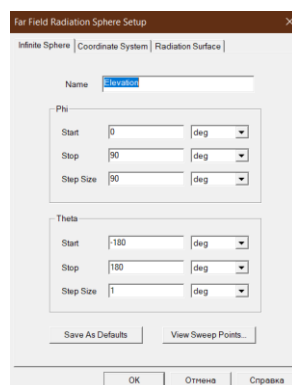


Рисунок 3.24 – Вигляд налаштувань випромінювання

Після створення відкритої області проводяться симуляції для визначення її впливу на характеристики дипольної антени. Аналіз отриманих результатів дозволяє оцінити їх відповідність теоретичним очікуванням і вимогам проекту. У разі необхідності, параметри відкритої області коригуються для покращення точності моделювання, після чого симуляції проводяться повторно для підтвердження ефективності внесених змін.

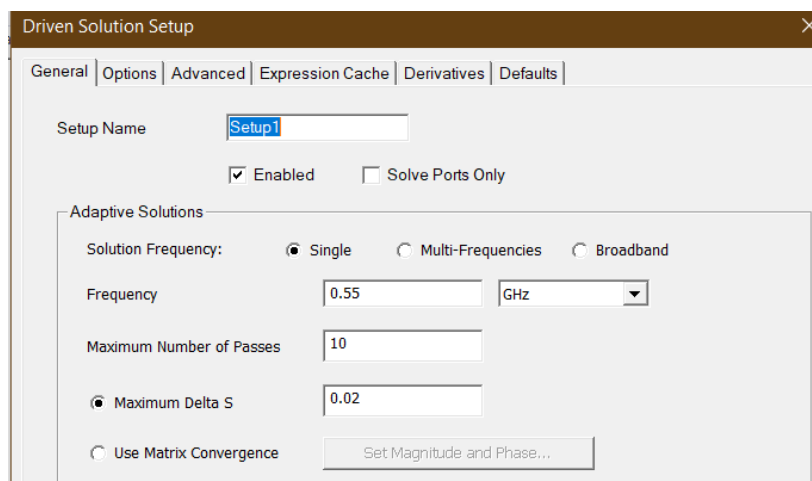


Рисунок 3.25 – Налаштування параметрів для подальшого моделювання

Наступним кроком є додавання параметрів для частотної розгортки.

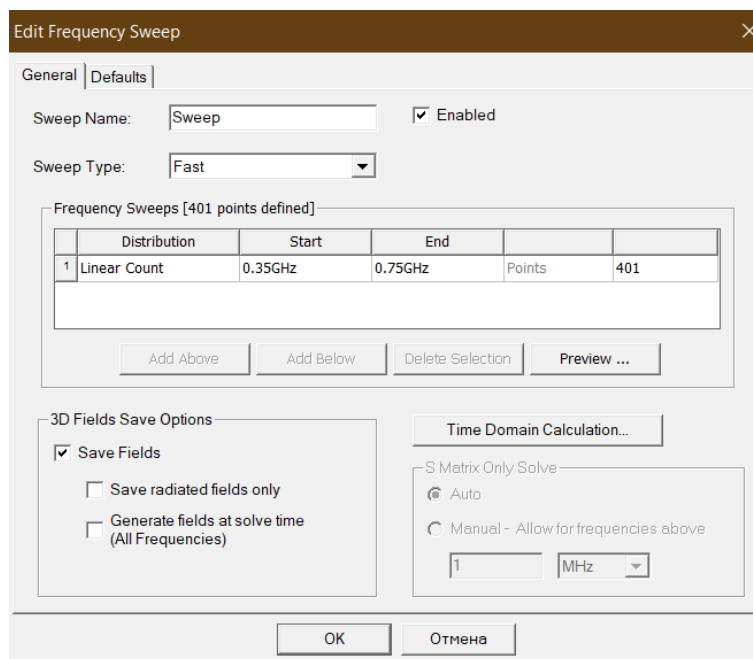


Рисунок 3.26 - Редагування частотної розгортки

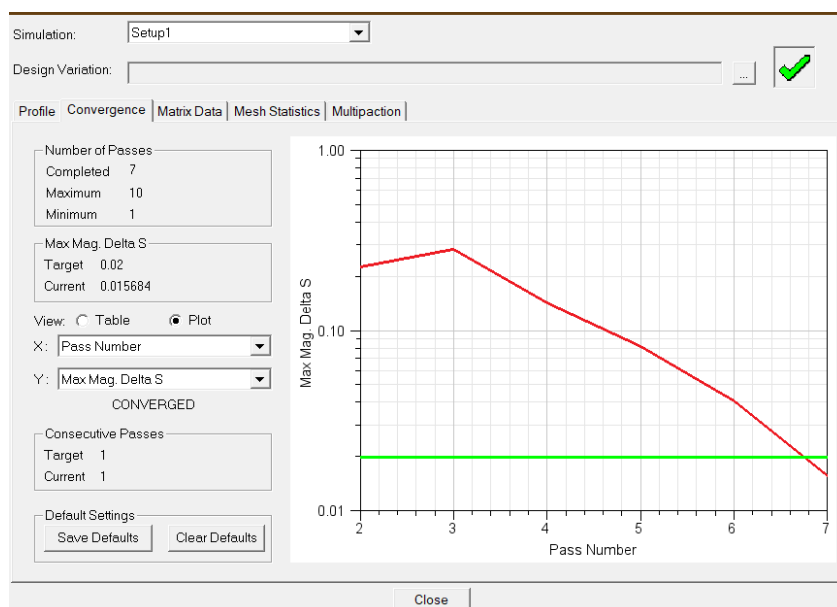


Рисунок 3.27 – Графік збіжності

На 7-му проході максимальний результат Delta S задовольняє критерій збіжності (Delta S Max = 0,02).

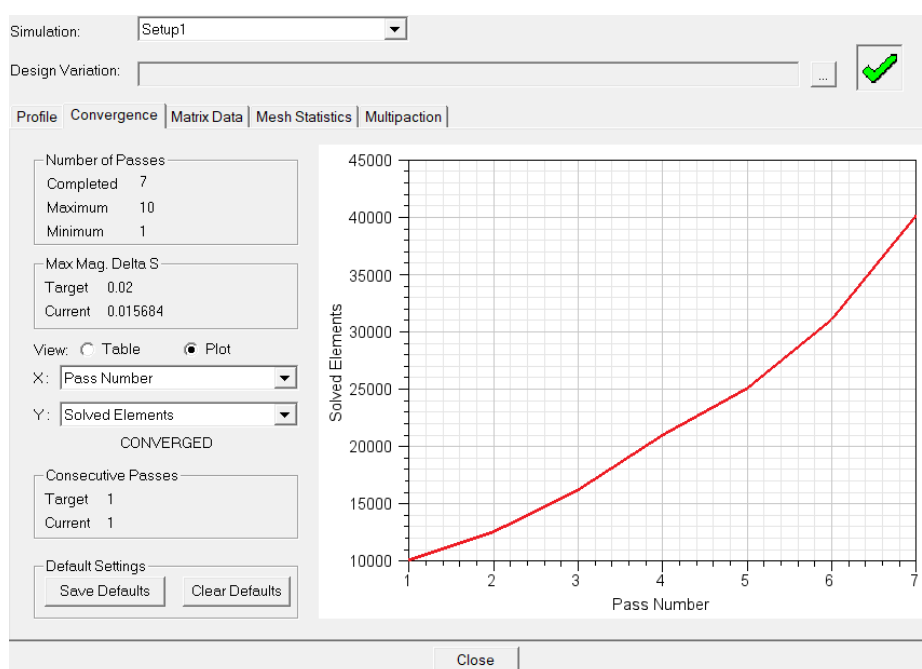


Рисунок 3.28 - Загальна кількість вирішених тетраедрів проти кількості пропусків

Freq	S:T1	Y:T1	Z:T1
350MHz	T1 (0.89847, -87.3)	(0.019081, 83.9)	(52.407, -83.9)
351MHz	T1 (0.89946, -87.9)	(0.019291, 83.9)	(51.836, -83.9)
352MHz	T1 (0.90043, -88.6)	(0.019505, 84)	(51.269, -84)
353MHz	T1 (0.90138, -89.2)	(0.019722, 84.1)	(50.704, -84.1)
354MHz	T1 (0.9023, -89.8)	(0.019944, 84.1)	(50.142, -84.1)
355MHz	T1 (0.9032, -90.5)	(0.020169, 84.2)	(49.582, -84.2)
356MHz	T1 (0.90408, -91.1)	(0.020388, 84.2)	(49.025, -84.2)

Рисунок 3.29 – Матричні дані для вибраного діапазону частот

Графік залежності S-параметру від частоти

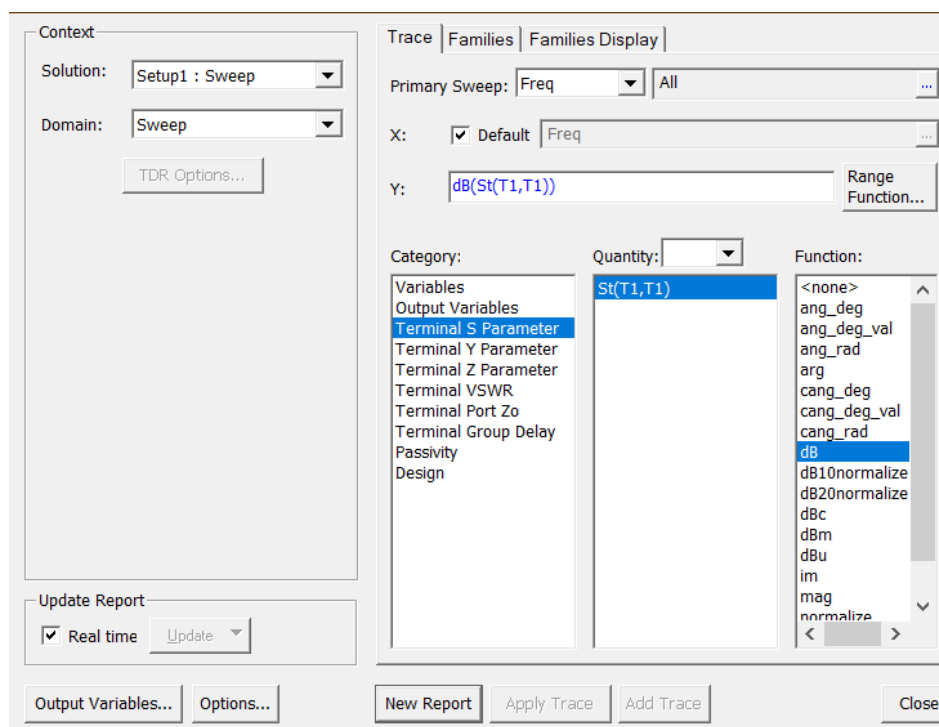


Рисунок 3.30 - Налаштування графіку S-параметрів

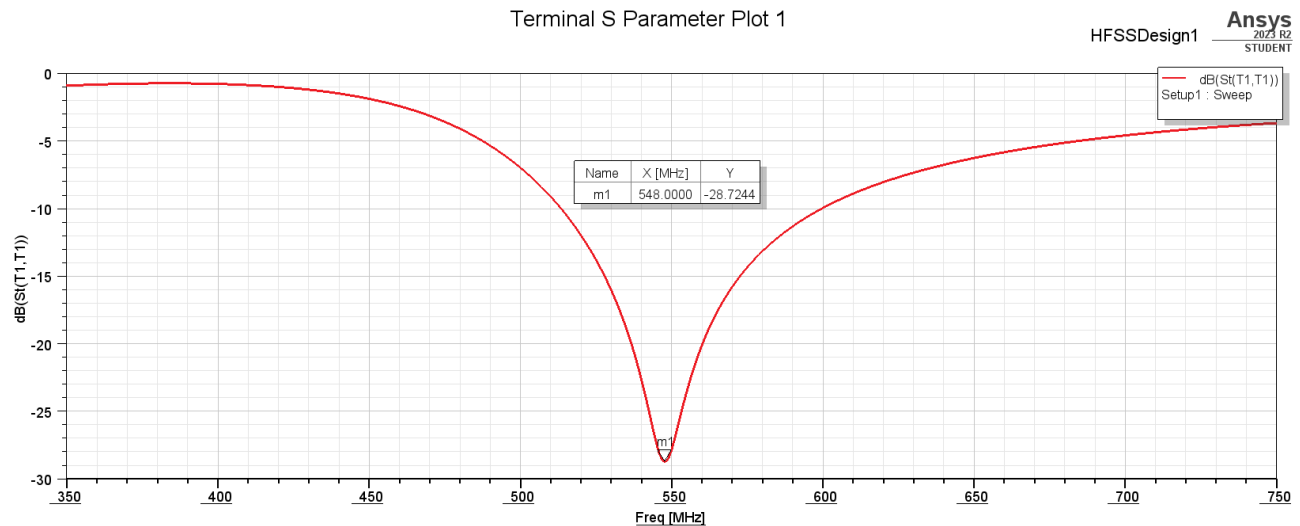


Рисунок 3.31 - Графік залежності S-параметру від частоти

Точка m1 визначає резонансну частоту дипольної антени яка є точкою найменшого відбиття сигналу.

Накладення графіків коефіцієнта підсилення дальнього поля потрібно для того, щоб оцінити діаграму спрямованості антени, створимо два графіки полярного поля, один з яких показує загальний коефіцієнт підсилення для $\phi = 0^\circ$, а другий - для $\phi = 90^\circ$.

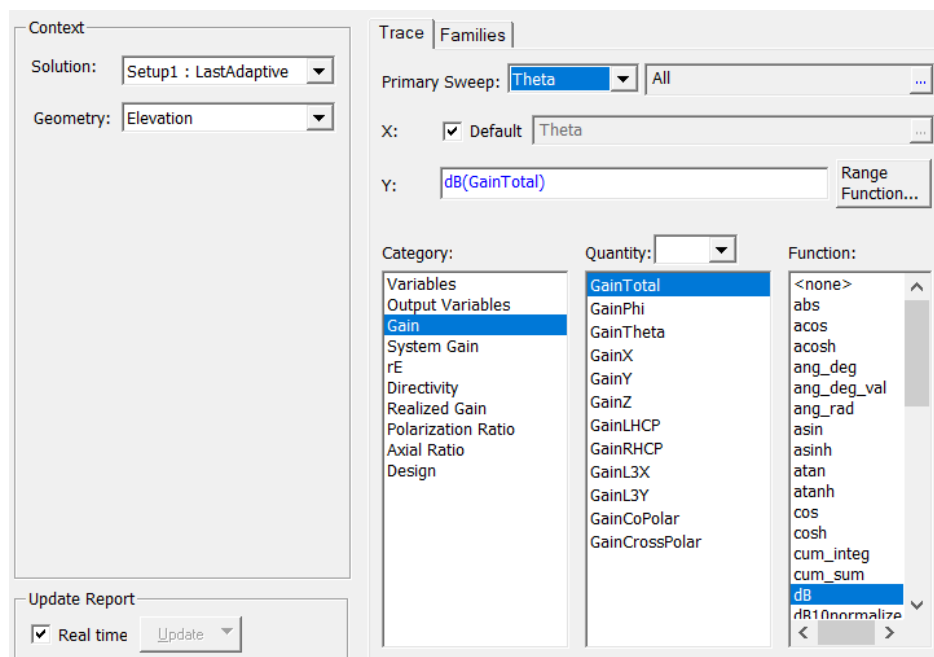


Рисунок 3.32 – Налаштування ділянки

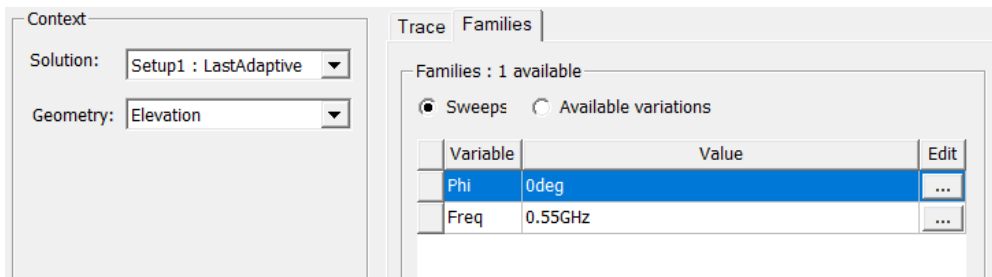


Рисунок 3.33 – Вибираємо зсув фази

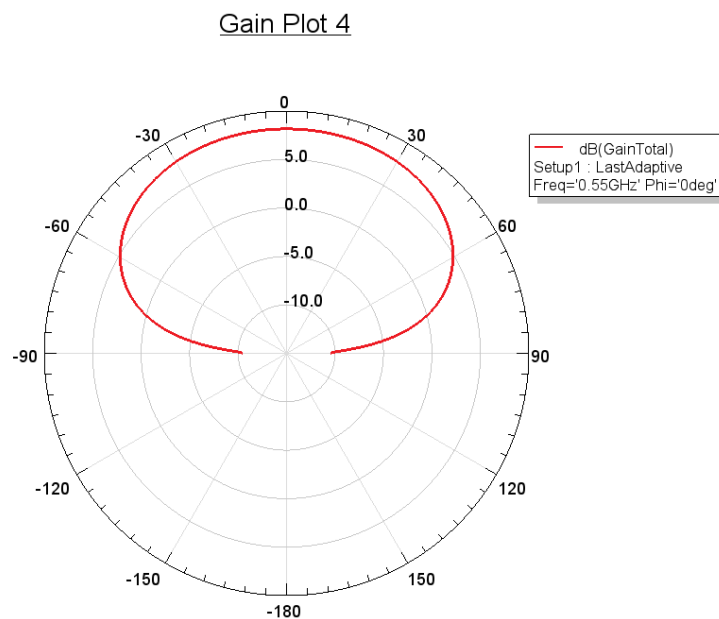
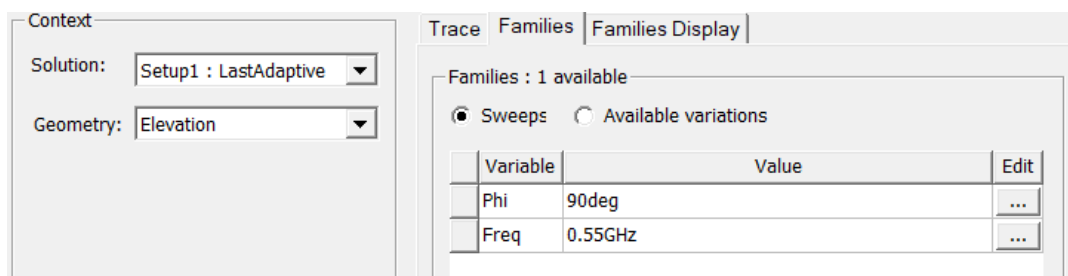
Рисунок 3.34 – Графік полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 0^\circ$ 

Рисунок 3.35 – Вибираємо зсув фази для іншого поля

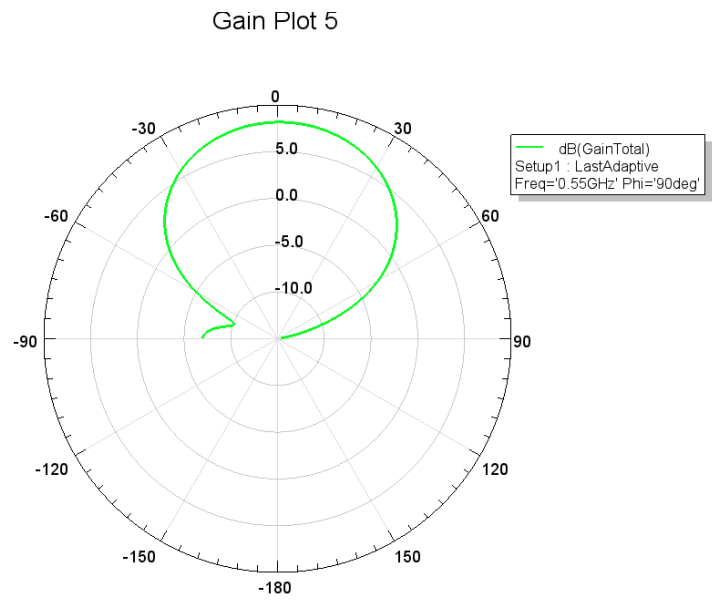


Рисунок 3.36 – Графік полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 90^\circ$

	Name	Visible	Transparency	Scale	Type
	Gain Plot 5	☒	0.90	0.60	2D
	Gain Plot 4	☒	0.90	0.60	2D

Рисунок 3.37 – Налаштування накладання поля випромінювання

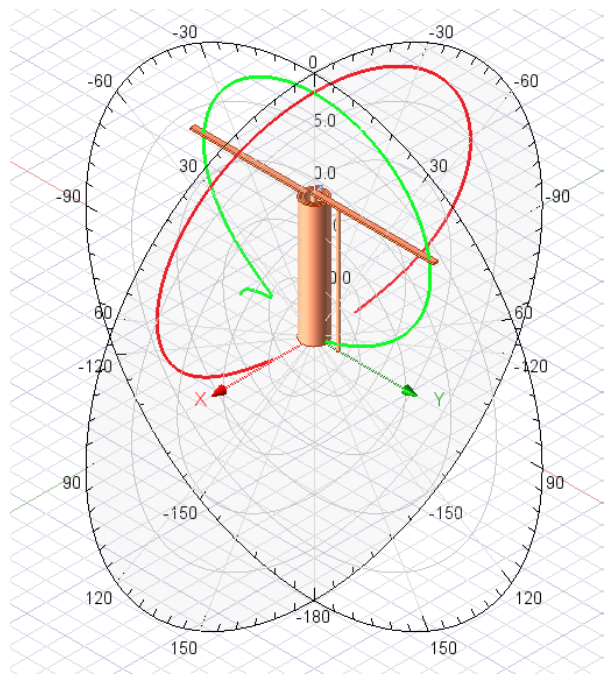


Рисунок 3.38 – Накладення поля випромінювання

Оскільки Дипольна антена повністю симетрична відносно площини YZ , діаграма підсилення при $\varphi = 0^\circ$ (червона крива) також повністю симетрична. Дипольна антена несиметрична відносно площини XZ (через штифт заземлення і незначну різницю у висоті та довжині елементів). Тому діаграма підсилення при $\varphi = 90^\circ$ (зелена крива) також несиметрична. Оскільки в нижній частині стержня існує нескінченна площа заземлення, немає результатів діаграми спрямованості для $\theta > 90^\circ$ або $\theta < -90^\circ$.

3.2.1 Моделювання зменшеної у 1.5 рази від досліджуваного розміру дипольної антени

Наступним етапом є дослідження впливу форми та розміру дипольної антени на ефективність її випромінювання. Для цього передбачено зміну розміру антени пропорційно на 1.5 рази від досліджуваного розміру, який був визначений у попередніх дослідженнях.

Перш за все, необхідно визначити досліджуваний розмір антени, з яким буде проводитись порівняння. Досліджуваний розмір відповідає параметрам, при яких антена демонструє найкращі характеристики випромінювання, такі як максимальна потужність випромінювання, мінімальні втрати та оптимальна діаграма спрямованості.

Після визначення досліджуваного розміру моделюється антена зі зменшеними розмірами, пропорційно на 1.5 рази від оптимальних параметрів. Це включає зміну довжини та ширини елементів антени відповідно до заданого коефіцієнта. Далі, за допомогою програмного забезпечення для моделювання, проводяться симуляції для аналізу характеристик зменшеної антени.

Особлива увага приділяється зміні таких параметрів, як діаграма спрямованості, рівень випромінювання та інші важливі характеристики. Результати порівнюються з характеристиками оптимальної антени для виявлення впливу зміни розміру на ефективність випромінювання.

Аналіз результатів дозволяє зробити висновки щодо впливу збільшення розміру на ефективність дипольної антени та визначити, чи покращуються або погіршуються її характеристики. Цей етап дослідження є важливим для розуміння взаємозв'язку між геометричними параметрами дипольної антени та її ефективністю, що дозволяє оптимізувати її конструкцію для конкретних застосувань.

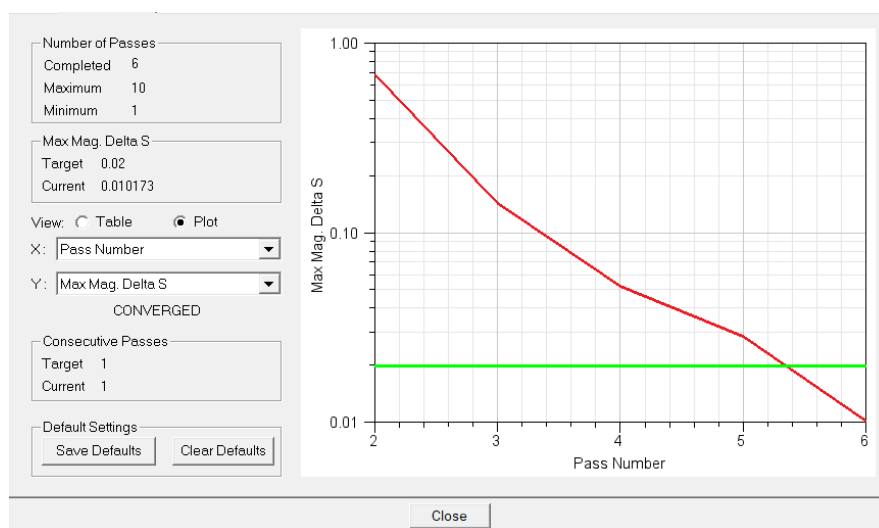


Рисунок 3.39 – Графік збіжності

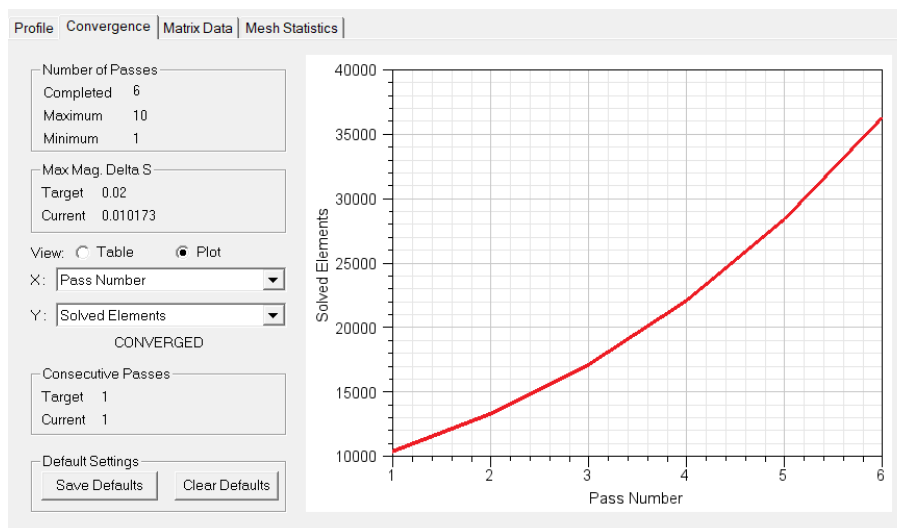


Рисунок 3.40 - Загальна кількість вирішених тетраедрів проти кількості пропусків

Freq	S:T1	Y:T1	Z:T1
550MHz	T1 (0.95481, -106)	(0.026768, 87.2)	(37.358, -87.2)
551MHz	T1 (0.95501, -107)	(0.026986, 87.2)	(37.056, -87.2)
552MHz	T1 (0.95519, -107)	(0.027208, 87.2)	(36.754, -87.2)
553MHz	T1 (0.95536, -108)	(0.027432, 87.3)	(36.453, -87.3)
554MHz	T1 (0.95551, -108)	(0.02766, 87.3)	(36.153, -87.3)
555MHz	T1 (0.95565, -109)	(0.027891, 87.3)	(35.853, -87.3)
556MHz	T1 (0.95578, -109)	(0.028126, 87.3)	(35.554, -87.3)

Рисунок 3.41 – Матричні дані для вибраного діапазону частот

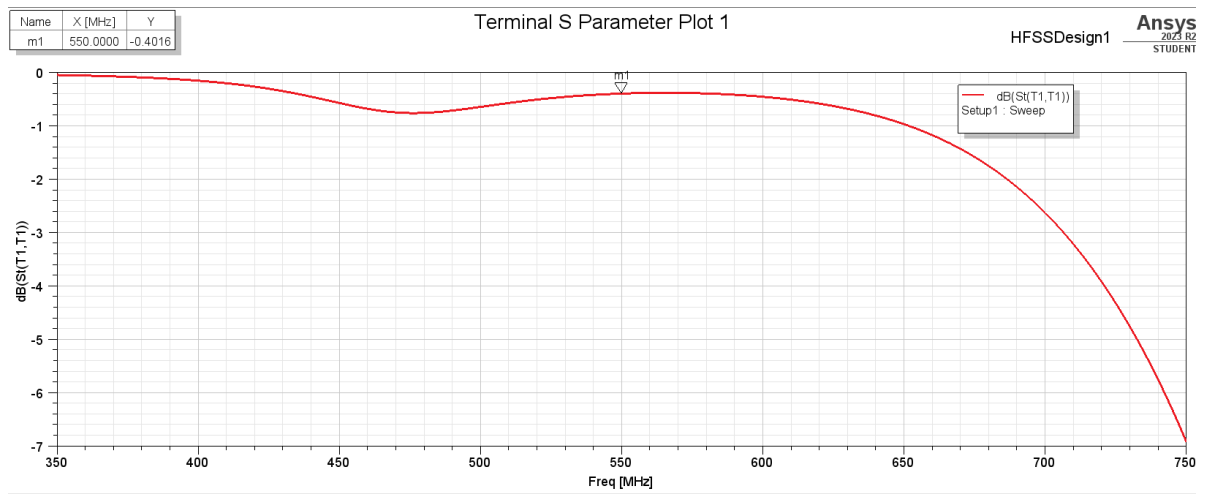
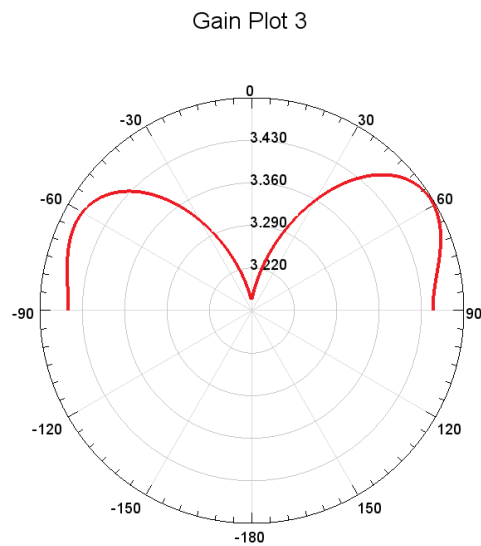


Рисунок 3.42 - Графік залежності S-параметру від частоти

Рисунок 3.43 – Графік полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 0^\circ$

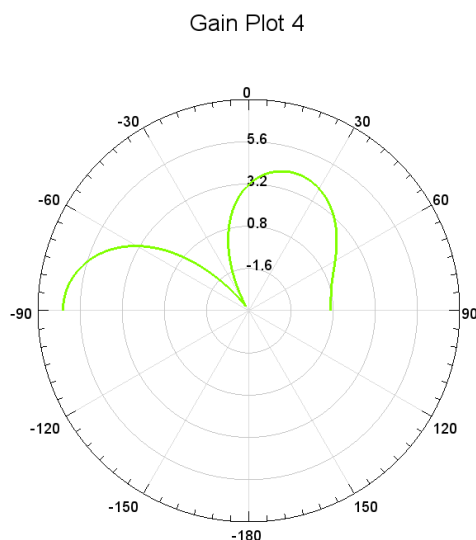


Рисунок 3.44 – Графік полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 90^\circ$

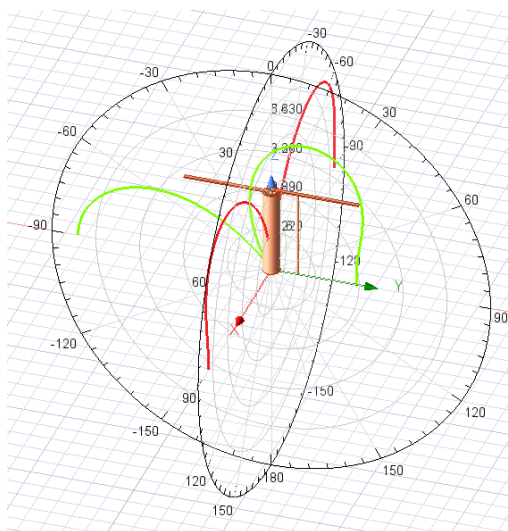


Рисунок 3.45 – Накладання поля випромінювання

3.2.2 Моделювання збільшеної у 1.5 рази від досліджуваного розміру дипольної антени

Наступним етапом є дослідження впливу збільшення розміру дипольної антени на ефективність її випромінювання. З цією метою антена буде збільшена пропорційно у 1.5 рази від досліджуваного розміру, визначеного у попередніх дослідженнях.

Спочатку встановлюються оптимальні розміри антени, які були визначені раніше як такі, що забезпечують найкращі характеристики випромінювання. Ці

розміри включають довжину, діаметр та інші геометричні параметри антени, при яких досягається максимальна ефективність роботи.

Далі, за допомогою програмного забезпечення для моделювання, розміри антени збільшуються пропорційно на 1.5 рази. Це означає, що кожен лінійний розмір антени (довжина плечей, діаметр стержня тощо) збільшується у 1.5 рази відносно оптимальних параметрів. Після цього здійснюється моделювання та симуляція роботи збільшеної антени.

Під час симуляції аналізуються ключові характеристики випромінювання антени, такі як діаграма спрямованості, рівень випромінювання та інші параметри, що впливають на ефективність роботи антени. Порівняння отриманих результатів з характеристиками оптимальної антени дозволяє оцінити вплив збільшення розміру на її ефективність.

Результати дослідження показують, як зміна розмірів антени впливає на її роботу в різних частотних діапазонах та умовах. Це дозволяє визначити, чи покращуються або погіршуються параметри випромінювання при збільшенні розмірів, та наскільки суттєвим є цей вплив.

Аналіз отриманих даних допомагає зробити висновки щодо доцільності збільшення розмірів антени для досягнення бажаних характеристик. У разі виявлення позитивного впливу, можливо, буде рекомендовано використовувати збільшені розміри для конкретних застосувань. В іншому випадку, може бути необхідно провести додаткові дослідження для оптимізації антени.

Цей етап дослідження є важливим для глибшого розуміння взаємозв'язку між розмірами дипольної антени та її ефективністю, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення при проектуванні антенних систем.

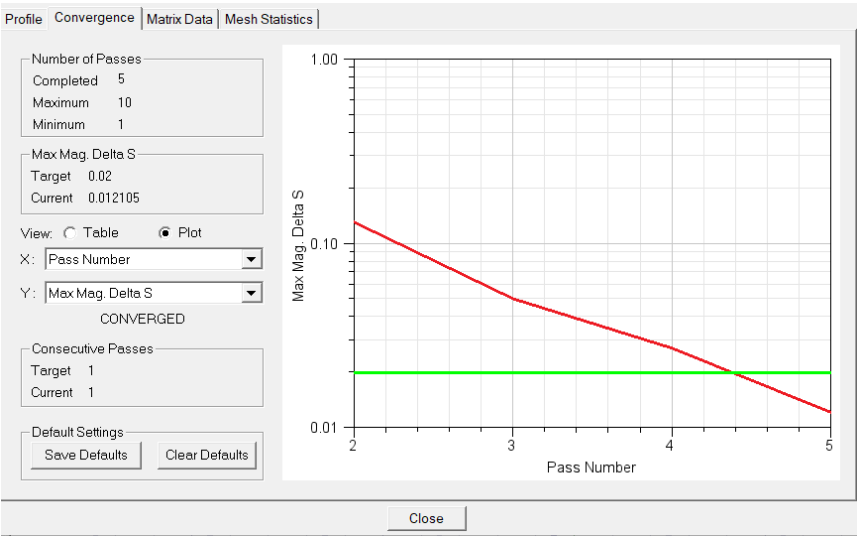


Рисунок 3.46 – Графік збіжності

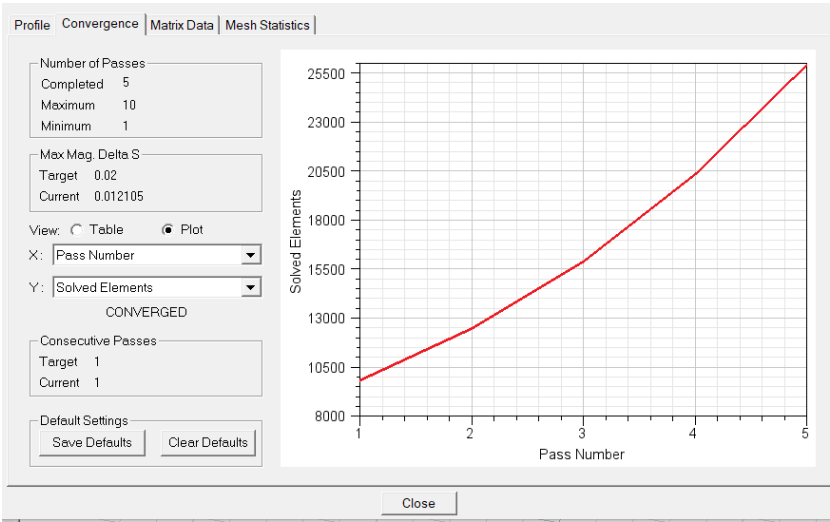


Рисунок 3.47 - Загальна кількість вирішених тетраедрів проти кількості пропусків

Profile | Convergence | Matrix Data | Mesh Statistics

☒ Display All Frequencies Edit Frequencies ...

☒ S Matrix ☒ Y Matrix ☒ Z Matrix ☐ Gamma ☐ Zo

View Format Passivity Export

Freq	S:T1	Y:T1	Z:T1
547MHz	T1 (0.77573, 16.9)	(0.0038936, -48.5)	(256.83, 48.5)
548MHz	T1 (0.77617, 15.9)	(0.0037621, -46.9)	(265.81, 46.9)
549MHz	T1 (0.77658, 14.9)	(0.0036341, -45.3)	(275.17, 45.3)
550MHz	T1 (0.77695, 14)	(0.0035101, -43.5)	(284.89, 43.5)
551MHz	T1 (0.77728, 13)	(0.0033904, -41.5)	(294.95, 41.5)
552MHz	T1 (0.77757, 12.1)	(0.0032755, -39.4)	(305.29, 39.4)

Close

Рисунок 3.48 – Матричні дані для вибраного діапазону частот

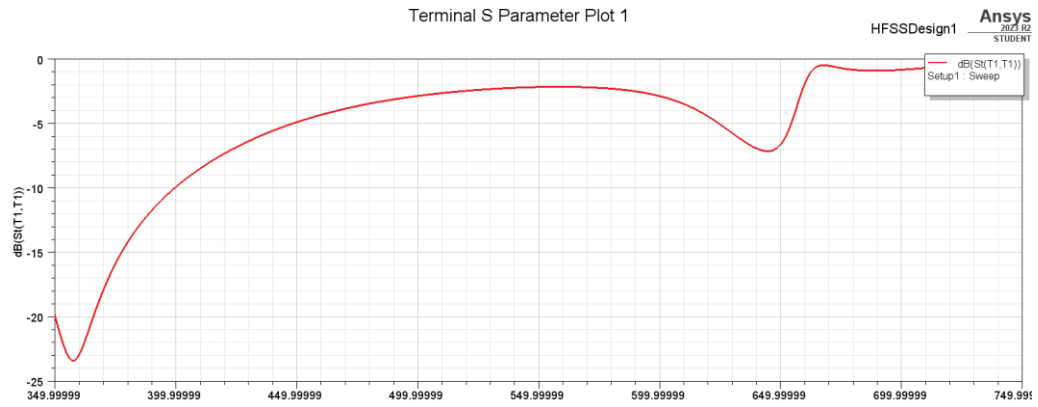


Рисунок 3.49 - Графік залежності S-параметру від частоти

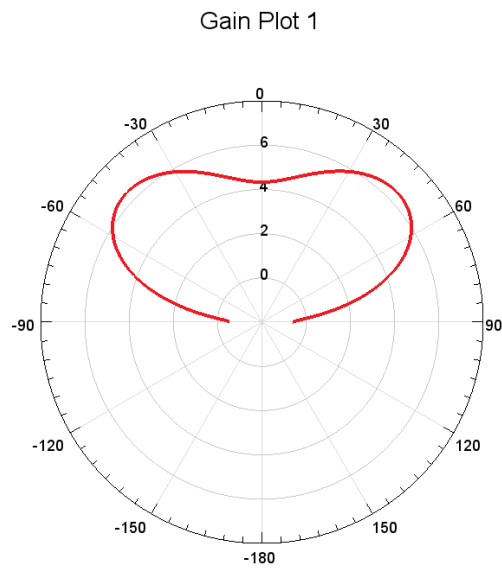


Рисунок 3.50 – Графік полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\phi = 0^\circ$

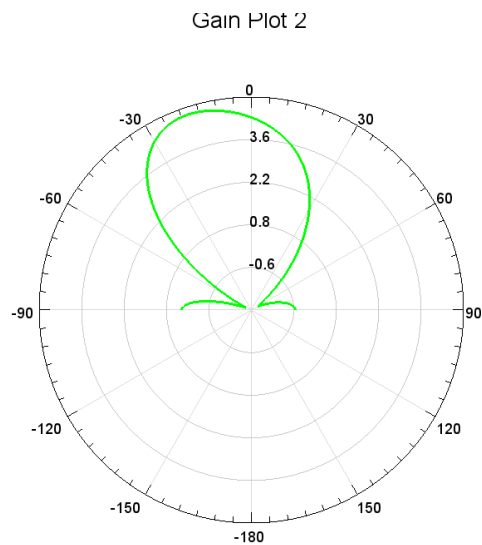


Рисунок 3.51 – Графік полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\phi = 90^\circ$

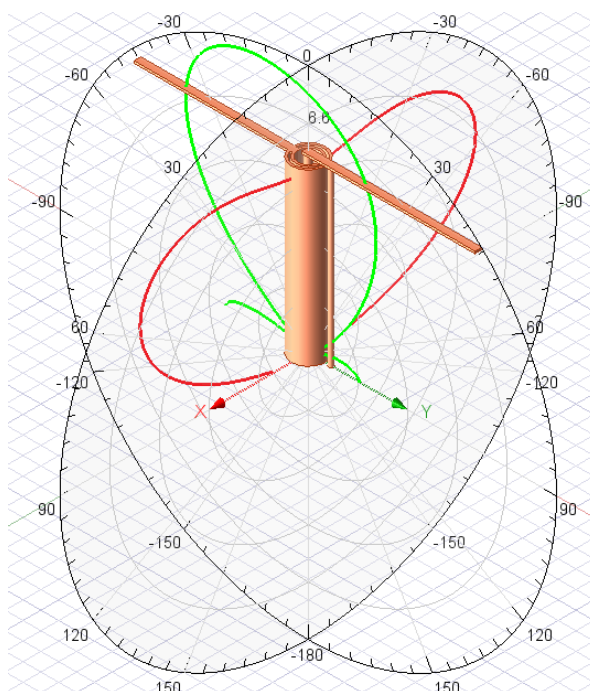


Рисунок 3.52 – Накладання поля випромінювання

3.3 Порівняння результатів моделювання

3.3.1 Порівняльний аналіз графіків збіжності

1. Досліджуваний розмір дипольної антени (7 проходів):

- Кількість проходів: 7
- Поточне значення ΔS : 0.015684
- Досліджуваний розмір антени досягає збіжності після семи проходів, з деякими коливаннями ΔS на початку.

2. Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени (6 проходів):

- Кількість проходів: 6
- Поточне значення ΔS : 0.010173
- Зменшений розмір антени показує стабільне зменшення ΔS , досягаючи порогу збіжності після шостого проходів.

3. Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени (5 проходів):

- Кількість проходів: 5
- Поточне значення ΔS : 0.012105

- Збільшений розмір антени досягає збіжності швидше, ніж інші розміри, після п'ятого проходу.

Отже:

1. Швидкість збіжності:

- Досліджуваний розмір (7 проходів): Потребує найбільше проходів для досягнення збіжності, з деякими коливаннями на початку.
- Зменшений розмір (6 проходів): Також показує добру швидкість збіжності, досягаючи порогу після шостого проходу.
- Збільшений розмір (5 проходів): Найшвидша збіжність серед трьох варіантів, досягаючи порогу після п'ятого проходу.

2. Стабільність збіжності:

- Досліджуваний розмір (7 проходів): Деякі коливання на початку, але врешті-решт досягає збіжності.
- Зменшений розмір (6 проходів): Найбільш стабільний процес збіжності, без коливань.
- Збільшений розмір (5 проходів): Досить стабільний, хоча незначні коливання можуть бути присутні.

3. Ефективність різних розмірів антени:

- Досліджуваний розмір (7 проходів): Незважаючи на більшу кількість проходів, цей розмір може бути збалансованим вибором для забезпечення надійної роботи антени в різних умовах.
- Зменшений розмір (6 проходів): Також має швидку і стабільну збіжність, що свідчить про ефективність зменшеного розміру для моделювання. Важливо перевірити, як зменшений розмір впливає на робочі параметри антени.
- Збільшений розмір (5 проходів): Показує найшвидшу збіжність, що може бути вигідним для прискорення процесу моделювання.

Розмір дипольної антени має значний вплив на швидкість і стабільність збіжності під час моделювання. Збільшений розмір демонструє найшвидшу

збіжність, але варто перевірити інші характеристики антени. Зменшений розмір є стабільним і ефективним, тоді як Досліджуваний розмір потребує більше проходів, але може бути більш надійним у різних умовах. Вибір розміру антени повинен враховувати специфічні вимоги до роботи антени та параметри моделювання.

3.3.2 Порівняльний аналіз кількості вирішених тетраедрів

Кожне зображення показує, як збільшується кількість вирішених тетраедрів (Solved Elements) зі збільшенням кількості проходів (Pass Number). Ось детальний опис кожного зображення:

1. Досліджуваний розмір дипольної антени:

- Кількість проходів: 7;
- Максимальна кількість проходів: 10;
- Мінімальна кількість проходів: 1;
- Поточне значення Max Mag. Delta S: 0.015684;
- Кількість вирішених елементів: Збільшується до приблизно 45000.

2. Зменшений розмір дипольної антени:

- Кількість проходів: 6;
- Максимальна кількість проходів: 10;
- Мінімальна кількість проходів: 1;
- Поточне значення Max Mag. Delta S: 0.010173;
- Кількість вирішених елементів: Збільшується до приблизно 38000.

3. Збільшений розмір дипольної антени:

- Кількість проходів: 5;
- Максимальна кількість проходів: 10;
- Мінімальна кількість проходів: 1;
- Поточне значення Max Mag. Delta S: 0.012105;
- Кількість вирішених елементів: Збільшується до приблизно 25500.

Загальна тенденція полягає в тому, що кількість вирішених елементів зростає зі збільшенням кількості проходів. Кожне зображення показує, що симуляція досягла стану конвергенції, оскільки поточне значення Max Mag. Delta S менше або дорівнює цільовому значенню 0.02.

3.3.3 Порівняльний аналіз графіків залежності S-параметру від частоти

Опис графіків:

1. Досліджуваний розмір дипольної антени:

- Частотний діапазон: від 350 МГц до 750 МГц;
- Значення S-параметра ($|S_{11}|$): до -30 дБ;
- Мінімальне значення: -29.7244 дБ при частоті 548 МГц.

2. Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного:

- Частотний діапазон: від 350 МГц до 750 МГц;
- Значення S-параметра ($|S_{11}|$): до -7 дБ;
- Мінімальне значення: -4.4016 дБ при частоті 550 МГц.

3. Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного:

- Частотний діапазон: від 343.99999 МГц до 743.99999 МГц;
- Значення S-параметра ($|S_{11}|$): до -25 дБ;
- Мінімальне значення: приблизно -25 дБ при частоті близько 400 МГц;
- Пікове значення: біля 650 МГц.

Порівняння:

1. Частотний діапазон:

- Усі графіки охоплюють широкий частотний діапазон приблизно від 350 МГц до 750 МГц;
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного має трохи ширший частотний діапазон (343.99999 МГц до 743.99999 МГц).

2. Мінімальні значення S-параметра:

- Досліджуваний розмір дипольної антени має найбільшу мінімальну глибину -29.7244 дБ при 548 МГц, що вказує на дуже низький коефіцієнт відбиття і високу ефективність випромінювання на цій частоті;
- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного має мінімальне значення -4.4016 дБ при 550 МГц, що свідчить про вищий коефіцієнт відбиття порівняно з досліджуваним розміром;
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного має мінімальне значення близько -25 дБ при частоті близько 400 МГц, що також є дуже низьким коефіцієнтом відбиття, але трохи гіршим за графік досліджуваного розміру.

3. Загальна форма графіків:

- Досліджуваний розмір дипольної антени має глибокий провал на частоті близько 548 МГц, що є ознакою резонансу антени на цій частоті;
- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного показує менш виражений провал і більш плавний характер, без значних мінімумів, що може свідчити про меншу ефективність антени;
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного має глибокий провал на частоті близько 400 МГц та пікове значення біля 650 МГц, що вказує на різні резонансні частоти антени.

Висновки:

- Досліджуваний розмір дипольної антени демонструє найглибший провал S -параметра, що вказує на найнижчий коефіцієнт відбиття і, відповідно, найвищу ефективність випромінювання на частоті близько 548 МГц;
- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного показує менш виражений провал, що свідчить про меншу ефективність випромінювання порівняно з досліджуваним розміром;
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного має глибокий провал при частоті близько 400 МГц, що вказує на іншу резонансну частоту антени і високу ефективність випромінювання на цій ча-

стоті, але загальний характер графіка свідчить про складнішу поведінку антени в широкому діапазоні частот.

Ці результати демонструють вплив змін форми та розмірів дипольної антени на її резонансні частоти та ефективність випромінювання.

3.3.4 Порівняльний аналіз графіків полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 0^\circ$

Графіки:

1. Досліджуваний розмір дипольної антени:

- Осьовий діапазон: від -90° до $+90^\circ$;
- Коефіцієнт підсилення: від -10 дБ до +5 дБ;
- Частота: 0.55 ГГц;
- Форма діаграми спрямованості: рівномірна діаграма без значних спадів.

2. Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного:

- Осьовий діапазон: від -150° до $+150^\circ$;
- Коефіцієнт підсилення: від 3.22 дБ до 3.43 дБ;
- Форма діаграми спрямованості: V-подібний малюнок з вираженими піками та мінімумами.

3. Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного

- Максимальний коефіцієнт підсилення: приблизно 6 дБ;
- Форма діаграми спрямованості: майже симетрична діаграма з рівномірним підсиленням на всіх кутах.

Порівняння:

1. Коефіцієнт підсилення:

- Досліджуваний розмір дипольної антени показує широкий діапазон значень коефіцієнта підсилення від -10 дБ до +5 дБ, що свідчить про ширший діапазон змін ефективності антени.

- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного має менший діапазон підсилення, обмежений від 3.22 дБ до 3.43 дБ, що вказує на стабільнішу, але менш варіативну характеристику підсилення.
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного показує найвищий коефіцієнт підсилення, але з найбільш симетричною діаграмою спрямованості.

2. Діаграма спрямованості:

- Досліджуваний розмір дипольної антени демонструє більш плоский характер діаграми, яка є майже круглою з деякими відхиленнями, показуючи більш рівномірне випромінювання навколо антени.
- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного має виражений V-подібний малюнок, що свідчить про наявність основних напрямків випромінювання та мінімумів у діаграмі.
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного демонструє рівномірне підсилення на всіх кутах, що може свідчити про рівномірний характер випромінювання.

3. Направленість випромінювання:

- Досліджуваний розмір дипольної антени має широку діаграму, яка не демонструє виражених мінімумів, що може вказувати на омнідирекційний характер випромінювання.
- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного має мінімум у напрямку $\varphi = 0^\circ$, що вказує на направлений характер випромінювання з мінімумом на осі.
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного демонструє рівномірне підсилення на всіх кутах, що може свідчити про більш рівномірний розподіл випромінювання.

4. Частота:

- Досліджуваний розмір дипольної антени явно вказує частоту 0.55 ГГц, на якій проводилось моделювання.

- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного не містить інформації про частоту, що ускладнює пряме порівняння за цим параметром.

Висновок:

Графіки показують різні характеристики випромінювання антени. Досліджуваний розмір дипольної антени вказує на більш рівномірне випромінювання з ширшим діапазоном підсилення. Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного демонструє спрямоване випромінювання з чітко вираженими напрямками та мінімумами у діаграмі спрямованості, а також менший діапазон значень підсилення. Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного показує найвищий коефіцієнт підсилення з рівномірним розподілом випромінювання. Це вказує на те, що форма та розміри антени можуть суттєво впливати на її діаграму спрямованості та коефіцієнт підсилення.

3.3.5 Порівняльний аналіз графіків полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 90^\circ$

Опис графіків 90:

1. Досліджуваний розмір дипольної антени:
 - Максимальний коефіцієнт підсилення: приблизно 5 дБ;
 - Форма: широка діаграма спрямованості, зменшення підсилення на низьких кутах (від -120° до -180°).
2. Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного:
 - Максимальний коефіцієнт підсилення: приблизно 5.6 дБ;
 - Форма: має вузький лоб підсилення, з виразними зменшеннями підсилення на кутах близько -90° та $+90^\circ$.
3. Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного:
 - Максимальний коефіцієнт підсилення: приблизно 3.6 дБ;
 - Форма: має помірно широкий лоб підсилення, з характерним зменшенням підсилення на низьких кутах (-90° та $+90^\circ$).

Порівняння:

1. Максимальний коефіцієнт підсилення:

- Досліджуваний розмір дипольної антени: має максимальний коефіцієнт підсилення близько 5 дБ;
- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного: демонструє найбільший максимальний коефіцієнт підсилення - близько 5.6 дБ;
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного: має найменший максимальний коефіцієнт підсилення - близько 3.6 дБ.

2. Форма діаграми направленості:

- Досліджуваний розмір дипольної антени: показує більш широке розподілення підсилення з меншими зменшеннями на кутах від -120° до -180° ;
- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного: має вузький і високий лоб підсилення з помітними зменшеннями на кутах -90° та $+90^\circ$, що вказує на більш сконцентроване випромінювання;
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного показує проміжну форму між першим і другим графіками з помірно широким розподіленням підсилення і зниженням на кутах -90° та $+90^\circ$.

3. Ефективність випромінювання:

- Досліджуваний розмір дипольної антени: демонструє стабільне і широке підсилення, що робить його ефективним в більш широкому діапазоні кутів;
- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного: є найбільш ефективним у напрямку $\varphi = 90^\circ$ з максимально високим коефіцієнтом підсилення;
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного: має найменший коефіцієнт підсилення, але все ще демонструє характерну дипольну спрямованість.

Висновки:

- Досліджуваний розмір дипольної антени: забезпечує збалансоване і стабільне підсилення в широкому діапазоні кутів, що робить його ефективним для загальних застосувань.
- Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного: показує найвищий максимальний коефіцієнт підсилення, що вказує на підвищену ефективність випромінювання у вузькому діапазоні кутів.
- Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного: демонструє найменший коефіцієнт підсилення, але може бути корисним для застосувань, де потрібна більш рівномірна спрямованість випромінювання в широкому діапазоні кутів.

3.3.6 Порівняльний аналіз графіків накладення поля випромінювання

Опис графіків:

1. Досліджуваний розмір дипольної антени:

- Графік показує, що випромінювання є майже симетричним і рівномірним навколо дипольної антени.
- Коефіцієнт підсилення (Gain) рівномірно розподілений, що свідчить про ефективне випромінювання в різних напрямках.

2. Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного:

- Графік демонструє, що зменшення розміру антени призводить до значної зміни в діаграмі спрямованості.
- Спостерігається концентрація випромінювання в певних напрямках, що може свідчити про збільшення направленості антени, але зниження ефективності випромінювання в інших напрямках.

3. Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного:

- Графік показує, що збільшення розміру антени також змінює характер випромінювання.

- Випромінювання стає менш симетричним, і з'являються нові максимум і мінімум у діаграмі спрямованості.

Порівняння:

1. Симетрія та рівномірність випромінювання:

- Досліджуваний розмір антени демонструє найкращу симетрію та рівномірність випромінювання.
- Зменшений розмір показує концентрацію випромінювання в певних напрямках, що може бути корисно для специфічних застосувань.
- Збільшений розмір антени призводить до появи нових максимумів та мінімумів у випромінюванні, що вказує на складніший характер поля.

2. Ефективність випромінювання:

- Досліджуваний розмір забезпечує найбільш ефективне випромінювання з рівномірним коефіцієнтом підсилення.
- Зменшення розміру антени зменшує ефективність випромінювання в деяких напрямках, але може збільшити його в інших.
- Збільшення розміру антени створює нові напрямки з високим підсиленням, але ефективність може знизитись через появу нових мінімумів.

3. Практичне застосування:

- Досліджуваний розмір є найкращим вибором для загальних випадків, де потрібна рівномірність та ефективність випромінювання.
- Зменшений розмір може бути корисним для направлених антен, де потрібна концентрація випромінювання в одному напрямку.
- Збільшений розмір може використовуватись для специфічних випадків, де потрібні додаткові напрямки випромінювання з високим підсиленням.

Висновок:

Зміна розміру дипольної антени суттєво впливає на її діаграму спрямованості та коефіцієнт підсилення. Досліджуваний розмір забезпечує найкращі характеристики випромінювання, тоді як зменшення або збільшення розміру призводить до значних змін у діаграмі спрямованості та ефективності випромінювання.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є важливою складовою професійної діяльності, забезпечуючи здоров'я та безпеку працівників і підвищуючи ефективність виробничих процесів. Сучасні вимоги до охорони праці стають суворішими через зростаючу складність виробничих систем і збільшення потенційних ризиків. У галузі електроніки та телекомунікацій, зокрема при проектуванні та дослідженні антен, питання охорони праці мають особливе значення через потенційні небезпеки електромагнітного випромінювання та високовольтних систем.

Дослідження впливу форми та розміру дипольної антени на ефективність її випромінювання проводяться для визначення оптимальних параметрів. У процесі дослідження використовується комп'ютерне моделювання. Аналіз потенційних небезпек згідно з ДСТУ ISO 45001:2019 включає розгляд можливих виробничих факторів, здатних призвести до травм або пошкодження здоров'я працівників. Основними небезпеками є електромагнітне випромінювання високої інтенсивності, ризики ураження електричним струмом та механічні травми під час монтажу та налаштування обладнання.

Також важливо забезпечити відповідність мікроклімату лабораторії санітарним нормам, зокрема температурі, вологості та швидкості повітряного потоку. Оптимальне освітлення робочого місця запобігає напрузі очей та головному болю. Врахування психофізіологічних факторів, таких як стрес та втома, є критичним для забезпечення безпеки працівників.

При порушенні правил охорони праці може виникнути загроза здоров'ю працівників. Особлива увага приділяється безпеці на кожному етапі дослідження. Відповідно до ДСТУ OHSAS 18002:2015 і ДСТУ ISO 45001:2019, процес управління охороною праці інтегрується у всі виробничі процеси. У цьому розділі розглядаються питання безпечної експлуатації обладнання, гігієни праці, промислової санітарії та пожежної безпеки, з особливою увагою до мінімізації ризиків електромагнітного випромінювання та дотримання норм охорони праці.

4.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи

Для забезпечення безпечної експлуатації дипольних антен та проведення досліджень щодо їх форми та розміру, необхідно враховувати ряд технічних рішень, що гарантують безпеку під час експлуатації обладнання та виконання експериментальних робіт. Нижче наведено основні технічні рішення з відповідними посиланнями на нормативні документи.

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Організація робочих місць і приміщень:

– Робочі місця повинні бути організовані таким чином, щоб забезпечувати достатньо простору для безпечної роботи та проходу між робочими зонами. Це передбачає відповідне розміщення меблів, устаткування та засобів обчислювальної техніки відповідно до ДСТУ 8604:2015 "Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи [32].

Загальні ергономічні вимоги та НПАОП 0.00-7.15-18 "Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями" [33]:

Організація робочого місця розробника, який працює за комп'ютером повинна забезпечувати відповідність усіх елементів робочого місця та їх взаємного розташування ергономічним вимогам. Виконуючи практичні завдання щодо використання робочої пози, потрібно:

- Забезпечити зручну та стабільну конструкцію робочого столу.
- Розташувати клавіатуру на оптимальній висоті.
- Регулювати висоту та нахил екрана монітора.
- Забезпечити зручне розташування миші або трек паду.
- Забезпечити належну підтримку спини та комфортне сидіння на стільці.
- Підтримувати правильну позицію тіла під час роботи.
- Організувати робочий простір з підставками для документів та обладнання.

- Забезпечити достатній простір для руху ногами та вільний доступ до розеток.

Ці заходи створять комфортні умови роботи та запобігають негативним впливам незручної позиції на здоров'я користувача комп'ютера.

Для роботи операторів ПК у положенні сидючи рекомендовані такі параметри робочого простору:

Для забезпечення ефективності та комфорту операторів комп'ютерів, які працюють у сидячому положенні, рекомендується враховувати такі параметри робочого простору: ширина - не менше 600 мм, глибина - не менше 500 мм, висота робочої поверхні над підлогою - від 800 до 850 мм.

Важливо також передбачити простір для ніг під робочою поверхнею: висота – менше як 700 мм, ширина - не менше 600 мм, глибина - не менше 500 мм.

Якщо необхідно, зверніть увагу на висоту робочого місця, щоб вона не перевищувала 1400 мм при огляді робочої зони [34].

4.1.2 Електробезпека

Електробезпека - це один із ключових аспектів охорони праці, який вимагає особливої уваги та компетентного підходу на будь-якому виробничому об'єкті. Запобігання ризикам, пов'язаним з електричними установками та пристроями, є надзвичайно важливою задачею для забезпечення безпеки працівників.

Можливі причини ураження електричним струмом на робочому місці включають:

1. Неізольовані провідники:
 - Контакт із пошкодженими або неізольованими провідниками.
2. Несправність обладнання:
 - Використання несправного або пошкодженого електричного обладнання.
3. Порушення правил експлуатації:
 - Неправильне підключення або використання електрообладнання.
4. Відсутність або погане заземлення:

- Недостатньо ефективного заземлення обладнання.

5. Перевищення допустимого навантаження:

- Перевищення навантаження на електричну мережу, що може призвести до перегріву і пошкодження ізоляції.

Для забезпечення безпечної експлуатації електроустановок необхідно дотримуватися вимог ПУЕ та "Правил безпечної експлуатації електроустановок" і вживати наступні заходи та засоби [35]:

1. Ізоляція струмоведучих частин:

Всі струмоведучі частини повинні бути надійно ізольовані. Ізоляція повинна відповідати нормативам, зокрема опір ізоляції нового устаткування не менше 1 кОм на 1 В напруги [36].

2. Захисне заземлення:

Для обладнання, що працює з напругою більше 1000 В, обов'язково повинно використовуватися захисне заземлення, яке забезпечує електричне з'єднання непровідних частин з землею, що запобігає електротравмам при пошкодженні ізоляції [37].

3. Автоматичне блокування доступу до небезпечних зон: Використання систем блокування, які відключають живлення при відкритті захисту або дверцят, забезпечуючи додатковий рівень захисту. [37].

4. Інструктаж: Працівники повинні проходити регулярні інструктажі з електробезпеки, щоб бути обізнаними про потенційні ризики та заходи безпеки.

Ці технічні рішення спрямовані на забезпечення максимальної безпеки під час експлуатації дипольних антен та проведення відповідних досліджень, що є важливою частиною процесу з охорони праці в даній галузі. Ці технічні рішення спрямовані на забезпечення максимальної безпеки під час експлуатації дипольних антен та проведення відповідних досліджень, що є важливою частиною процесу з охорони праці в даній галузі. Таким чином, інтеграція цих заходів у процес проектування та експлуатації антен сприяє створенню безпечного та здорового робочого середовища.

4.2 Технічні рішення з виробничої санітарії

У цьому підрозділі розглядаються вихідні дані та технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії. Враховуючи специфіку проведення досліджень з дипольними антенами, особливу увагу приділено мікроклімату, складу повітряного середовища, виробничому освітленню, шуму, вібрації та випромінюванню.

4.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат на виробництві є ключовим фактором, що впливає на здоров'я, продуктивність та комфорт працівників. Встановлення оптимальних умов температури, вологості та вентиляції допомагає знизити ризик професійних захворювань, підвищити ефективність роботи та забезпечити безпечні умови праці.

Постійний моніторинг і підтримка належної якості повітря на робочих місцях є необхідними для збереження здоров'я та безпеки працівників.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допуститмі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	23-25	40	0,1-0,2
Холодний	20-22	60	0,1

Технічні рішення забезпечення досліджуваного мікроклімату:

- Встановлення системи кондиціювання повітря для підтримання стабільної температури та вологості.
- Використання зволожувачів повітря в зимовий період для підтримки необхідного рівня вологості.
- Регулярне провітрювання приміщення для забезпечення циркуляції свіжого повітря.

Допустимі значення мікрокліматичних параметрів відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [34]. Вони забезпечують комфортні умови праці, запобігають виникненню теплових стресів і підтримують Досліджуваний рівень продуктивності праці.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

У сучасній техніці використовується багато речовин, які можуть забруднювати повітря і загрожувати здоров'ю працівників. Для оцінки небезпеки цих речовин досліджується їх вплив на людський організм і визначаються допустимі концентрації та дози, безпечні для людини.

При проведенні моделювання властивостей дипольної антени за допомогою комп'ютерних засобів можлива підвищена концентрація пилу та озону в приміщенні. Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у цьому приміщенні (відповідно до норм ДСН 3.3.6.042-99 [34]) наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,17	4
Озон	0,15	0,035	1

Технічні рішення забезпечення якості повітря:

- Встановлення системи фільтрації повітря для видалення шкідливих речовин.
- Регулярний контроль якості повітря за допомогою спеціальних приладів.
- Забезпечення витяжної вентиляції для видалення відпрацьованого повітря.

Для гігієнічної оцінки повітря, крім хімічного складу, має значення й іонний склад повітря. Чим чистіше повітря, тим більше воно містить легких від'ємних іонів. Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	410	610
Оптимальні	1400-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Технічні рішення для забезпечення якості повітря :

1. Кондиціонери та вентиляція:

- Використання кондиціонерів з функцією очищення та зволоження повітря допомагає підтримувати Досліджуваний мікроклімат у приміщенні. Це знижує рівень іонізації повітря та забезпечує комфортні умови для працівників.
- Регулярне обслуговування систем вентиляції та кондиціонування для забезпечення їх ефективної роботи та чистоти фільтрів.

2. Вологе прибирання:

- Регулярне вологе прибирання приміщень з використанням антистатичних засобів дозволяє зменшити кількість пилу та заряджених часток у повітрі.
- Вологе прибирання також сприяє підтримці оптимальної вологості повітря, що позитивно впливає на рівень іонізації.

3. Зелені насадження:

- Розміщення кімнатних рослин у робочих приміщеннях сприяє природному очищенню повітря та знижує рівень іонізації.

- Використання рослин з великими листками, які ефективно поглинають забруднення та сприяють підтримці здорового мікроклімату.

Ці заходи допомагають забезпечити комфортні та безпечні умови праці в приміщеннях з комп'ютерною технікою, сприяючи зниженню рівня іонізації повітря та покращенню загального стану мікроклімату.

4.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення робочих місць відіграє важливу роль у забезпеченні комфортних умов праці та зниженні ризику професійних захворювань. Правильне освітлення сприяє підвищенню продуктивності, зниженню втоми очей і запобіганню нещасних випадків на виробництві. У цьому підрозділі розглядаються технічні рішення з організації виробничого освітлення, що відповідають чинним нормативам і стандартам.

Природне освітлення на даному робочому місці є бічне одностороннє. Сучасні норми визначають, що мінімальна освітленість встановлюється за характеристикою зорової роботи з найменшим розміром об'єкта розрізнення, контрастом об'єкта із фоном і характеристикою фону. Нормованим параметром природного освітлення являється коефіцієнт природного освітлення (КПО). КПО встановлюється в залежності від розряду виконуваних зорових робіт.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні як представлено в ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [38] зазначені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє	Бокове	Верхнє	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,12 до 0,4	II	г	великий	світлий	950	350	7	2,3	4,1	1,3

Технічні рішення для забезпечення норми освітлення:

- Використання люмінесцентних або LED-ламп для забезпечення рівномірного освітлення.
- Встановлення додаткових джерел світла на робочих місцях для проведення точних вимірювань.
- Регулярне очищення світильників для підтримки їх ефективності.

Забезпечення якісного освітлення на робочих місцях, особливо при використанні комп'ютерної техніки, є ключовим аспектом створення безпечних та комфортних умов праці. Комплексний підхід до організації освітлення, що враховує всі вищезазначені фактори, сприяє підвищенню продуктивності праці та зниженню ризику виникнення професійних захворювань.

4.2.4 Виробничий шум

Шумове навантаження на робочому місці дослідника, що займається вивченням впливу форми та розміру дипольної антени на її ефективність, може виникати від різних джерел, таких як комп'ютерне обладнання, принтери, сканери, системи вентиляції та кондиціонування повітря, а також вентилятори охолодження.

Санітарні норми, що регулюють допустимі рівні виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку, визначені в ДСН 3.3.6.037-99 [35]. Відповідно до цих норм, рівні звукового тиску на робочих місцях повинні відповідати граничним спектрам (ГС), а еквівалентні рівні звуку не повинні перевищувати встановлені значення. Для умов виконання робіт, пов'язаних з моделюванням на комп'ютері, допустимий рівень звуку не повинен перевищувати 50 дБА (див. таблицю 4.5).

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер роботи	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	103	91	60	85	82	78	74	70	67	50

Для забезпечення відповідності санітарним нормам виробничого шуму та створення комфортних умов праці необхідно реалізувати такі технічні рішення:

1. Вибір малошумного обладнання:
 - Використання комп'ютерів, принтерів, сканерів та іншого обладнання з низьким рівнем шуму, що відповідають сучасним стандартам шумового впливу.
2. Оптимальне розташування обладнання:
 - Розміщення джерел шуму на максимальній відстані від робочих місць.
 - Використання окремих приміщень для шумного обладнання (наприклад, серверні кімнати).
3. Регулярне технічне обслуговування:
 - Періодична перевірка та обслуговування обладнання для запобігання підвищенню рівня шуму через зношування або несправності.
 - Очищення та заміна фільтрів у вентиляційних системах для підтримання їх ефективної та тихої роботи.

Забезпечення допустимих рівнів шуму є важливою складовою охорони праці, що сприяє збереженню здоров'я працівників, підвищенню їх продуктивності та створенню безпечних умов праці.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Виробничі випромінювання відіграють значну роль у створенні безпечних і комфортних умов праці, особливо в умовах роботи з електронним обладнанням і комп'ютерною технікою. Випромінювання можуть мати різні джерела, такі як дисплеї, системні блоки, мережеві пристрої та інше електротехнічне обладнання. Важливо забезпечити їх відповідність санітарним нормам, щоб мінімізувати вплив на здоров'я працівників.

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [34], визначаються гранично допустимі рівні електромагнітного випромінювання на робочих місцях. Ці норми встановлюють безпечні рівні інтенсивності електромагнітного поля (ЕМП) залежно від частоти випромінювання і тривалості перебування під його впливом. Основні параметри, що нормуються, включають:

- Електричне поле (E), В/м
- Магнітне поле (H), А/м
- Потік енергії (S), мкВт/см²

Джерела виробничих випромінювань:

1. Дисплеї комп'ютерів та моніторів:
 - РК та світлодіодні дисплеї випромінюють низький рівень ЕМП, але їх розміщення та використання можуть впливати на загальний рівень випромінювання на робочому місці.
2. Системні блоки та мережеве обладнання:
 - Джерела низькочастотного ЕМП, яке може поширюватися від кабелів, блоків живлення та інших компонентів.
3. Пристрої бездротового зв'язку:
 - Wi-Fi роутери, Bluetooth пристрої та мобільні телефони можуть бути джерелами високочастотного випромінювання.

Технічні рішення для забезпечення безпеки:

1. Зменшення інтенсивності випромінювань:

- Використання екранів та фільтрів для дисплеїв, що знижують рівень випромінювання.
- Вибір обладнання з низьким рівнем ЕМП.

2. Оптимальне розташування обладнання:

- Розміщення джерел випромінювання на достатній відстані від робочих місць.
- Використання захисних екранів та бар'єрів між джерелами випромінювання та працівниками.

Забезпечення дотримання санітарних норм щодо виробничих випромінювань є ключовим аспектом охорони праці.

4.3 Технічні рішення з пожежної безпеки

Пожежна безпека виробничих об'єктів стає не лише обов'язковою вимогою, але й ключовим аспектом у сучасному промисловому середовищі. Щоб забезпечити ефективний захист, потрібні кардинальні зміни в підходах та технічних рішеннях. До вимог Закону України «Про пожежну безпеку», НАПБА.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [39] на підприємстві застосовані такі технічні рішення з пожежної безпеки:

Причиною пожежі на робочому місці можуть бути такі фактори, як коротке замикання в електрообладнанні, перегрів електронних компонентів, недотримання правил електробезпеки, а також накопичення пилу та інших горючих матеріалів в приміщенні. Щоб запобігти виникненню пожежі та забезпечити оперативну реакцію у разі її виникнення, впроваджено наступні заходи:

1. Система оповіщення:

- Встановлено автоматичну систему оповіщення про пожежу, яка включає датчики диму та температури. Це дозволяє вчасно виявити загоряння та оперативно сповістити працівників і служби безпеки про небезпеку.

2. Вогнегасники:

- У приміщеннях розташовані вогнегасники, які відповідають типу можливих пожеж. Це можуть бути порошкові, вуглекислотні або водопінні

вогнегасники, які розміщені в легкодоступних місцях та позначені відповідними знаками.

3. Інструктаж і навчання:

- Обов'язково потрібно пройти інструктаж з пожежної безпеки, який включає інформацію про правила поведінки у разі виникнення пожежі, способи використання вогнегасників та порядок евакуації.

Ці заходи дозволяють значно знизити ризик виникнення пожежі та забезпечити оперативне реагування у випадку її виникнення, що відповідає вимогам Закону України «Про пожежну безпеку» та НАПБА.01.001-14 Правила ПБ в Україні.

ВИСНОВКИ

В результаті виконаної бакалаврської дипломної роботи було досягнуто основну мету – проведено моделювання дипольної антени різних розмірів за допомогою програмного забезпечення Ansys HFSS та здійснено аналіз її характеристик.

У першому розділі роботи розглянуто основні теоретичні відомості про антени, їх призначення та загальні характеристики. Окремо було досліджено основні параметри антен, що є важливими для розуміння подальшого моделювання та аналізу.

У другому розділі надано загальні відомості про дипольні антени, їх будову та принцип дії. Розглянуто різні варіації дипольних антен, включаючи короткий диполь, диполі різної довжини, напівхвильовий диполь, симетричний диполь та інші варіанти антен. Також досліджено характеристики дипольних антен, що є важливими для їх подальшого моделювання.

Третій розділ був присвячений дослідженню параметрів дипольної антени. Зокрема, проведено моделювання дипольної антени за допомогою програми Ansys HFSS. Було змодельовано досліджуваний розмір дипольної антени, а також антени зі зменшеними та збільшеними розмірами на 1.5 рази від досліджуваного. Проведено порівняльний аналіз результатів моделювання для трьох варіантів антен. Зокрема, проведено порівняльний аналіз графіків збіжності, кількості вирішених тетраєдрів, графіків залежності S-параметру від частоти, а також графіків полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 0^\circ$ та $\varphi = 90^\circ$.

У роботі також наведено розділ "Охорона праці", в якому розглянуто питання щодо безпечного виконання роботи, технічних рішень з гігієни праці та виробничої санітарії, а також пожежної безпеки.

Аналіз результатів показав наступне:

- Досліджуваний розмір дипольної антени демонстрував найбільш рівномірне та ефективне випромінювання.

- Зменшення розміру антени на 1.5 рази призвело до зниження коефіцієнта підсилення та зміни характеру випромінювання, що вказує на втрату ефективності.
- Збільшення розміру антени на 1.5 рази показало збільшення коефіцієнта підсилення, але водночас втрачається рівномірність випромінювання, що свідчить про зменшення омнідирекційності.

Таким чином, виконане моделювання та аналіз підтвердили важливість правильного вибору розмірів дипольної антени для забезпечення її оптимальних характеристик.

Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення конструкцій дипольних антен та їх застосування в різних галузях радіотехніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko, M. Stepanov. Method of the adaptive decoding of self-orthogonal codes in telecommunication. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 19, no. 3, pp. 1287-1296, Sept. 2020. DOI: 10.11591/ijeecs.v19.i3.pp1287-1296.
2. Balanis C.A. *Antenna Theory Analysis* / John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005. - 1073 p.
3. S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko. Wireless sensor network connectivity in heterogeneous 5G mobile systems. *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, Ukraine, October 2020, pp. 625–630.
4. J.G. Chieh, et al. Development of flat panel active phase array antennas using 5G silicon RFICs at Ku- and Ka-band. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 192669–192681, 2020.
5. Y. Fang, G. Bi, Y. L. Guan, F. C. M. Lau. A Survey on Protograph LDPC Codes and Their Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 1989-2016, Fourthquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2436705.
6. J. Boiko, I. Pyatin, O. Eromenko, O. Barabash. Methodology for Assessing Synchronization Conditions in Telecommunication Devices. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 5, pp. 320, 2020, DOI: 10.25046/aj050242.
7. A. Cyriac, G. Narayanan. Polar Code Encoder and Decoder Implementation. 2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, 2018, pp. 294-302, doi: 10.1109/CESYS.2018.8723895.
8. N. Nikolic et al. A septum polarizer with integrated square to circular tapered waveguide transition. *IEEE Int. Symp. on Antennas and Propagat. & USNC/URSI National Meeting*, pp.725–726, 2018.
9. S. I. Piltyay. High performance extended C-band 3.4-4.8 GHz dual circular polarization feed system. *Proc. XII Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Kyiv, Ukraine, pp.284–287, May 2017. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972644.

10. I. Gil, R. Fernández-García, and J. A. Tornero, “Embroidery manufacturing techniques for textile dipole antenna applied to wireless body area network,” *Text. Res. J.*, vol. 89, no. 8, pp. 1573–1581, Apr. 2019, doi: 10.1177/0040517518770682.
11. M. Chiu. Interleaved Polar (I-Polar) Codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 66, no. 4, pp. 2430-2442, April 2020, doi: 10.1109/TIT.2020.2969155.
12. E. Arıkan. Systematic Polar Coding. *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 860-862, August 2011, doi: 10.1109/LCOMM.2011.061611.110862.
13. S. D. Galiuk, M. Y. Kushnir, R. L. Politanskyi. Communication with use of symbolic dynamics of chaotic systems. 2011 21st International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, 2011, pp. 423-424.
14. J. Peng and L. Chen, “A Broadband Dual-Polarized Filtering Dipole Antenna with High Selectivity,” 2023 6th Int. Conf. Commun. Eng. Technol. ICCET, pp. 84–88, Feb. 2023, doi: 10.1109/ICCET58756.2023.00022.
15. S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, I. V. Demchenko. Analytical synthesis of waveguide iris polarizers. *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 18, pp. 1579–1597, November 2020. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10.
16. S. Gao, Q. Luo, and F. Zhu. *Circularly Polarized Antennas*. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons, 2014, 307.
17. T. Nguyen, R. Zenkyu, M. Hirabe, T. Maru, and E. Sasaki, “A study of orbital angular momentum generated by parabolic reflector with circular array feed,” in 2016 Int. Symp. on Antennas and Propag. (ISAP), Cottbus, Germany, 2016, pp. 708–709.
18. P. Schemmel, G. Pisano, and B. Maffei, “Modular spiral phase plate design for orbital angular momentum generation at millimetre wavelengths,” *Opt. Express*, vol. 22, no. 12, pp. 14712–14726, 2014.
19. N. Abdul Malek, R. D. Seager, J. A. Flint, and Z. Zainal Abidin, “Analysis, Optimization, and Hardware Implementation of Dipole Antenna Array for Wireless Applications,” *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2022, pp. 1–14, Aug. 2022, doi: 10.1155/2022/1741454.

20. G. Mansour, E. Nugoolcharoenlap, and F. Shkal, "Broadband Printed Dipole Array Antennas," 2023 IEEE 3rd Int. Maghreb Meet. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng. MI-STA, pp. 623–627, May 2023, doi: 10.1109/MI-STA57575.2023.10169392.
21. Z. Cai, Z. Weng, Y. Qi, J. Fan, and W. Zhuang, "A High-Performance Standard Dipole Antenna Suitable for Antenna Calibration," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 69, no. 12, pp. 8878–8883, Dec. 2021, doi: 10.1109/TAP.2021.3091637.
22. S. Chen, X. Shi, Y. Yao, Y. Gao, and Y. Yuan, "Enhanced Transmission Performance of a Dipole Antenna Based on a Ceramic Diamond-Structure PBG Substrate with a Defect Cavity," J. Electron. Mater., vol. 49, no. 9, pp. 5363–5367, Sep. 2020, doi: 10.1007/s11664-020-08269-6.
23. S. Berdnik, V. Katrich, M. Nesterenko, and O. Dumin, "Triple-Band Dipole Antenna for Wireless Communication Systems," 2021 IEEE 3rd Ukr. Conf. Electr. Comput. Eng. UKRCON, pp. 147–150, Aug. 2021, doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575711.
24. Firdaus, L. Monica, and Yustini, "Study on Impedance Matching of 2.4 GHz Dipole Antenna," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 846, no. 1, p. 012013, May 2020, doi: 10.1088/1757-899X/846/1/012013.
25. M. S. Ismail, A. R. Eldamak, and H. A. Ghali, "Meander Dipole Antenna for Low Frequency Applications," 2020 37th Natl. Radio Sci. Conf. NRSC, pp. 1–8, Sep. 2020, doi: 10.1109/NRSC49500.2020.9235109.
26. I. Adjali, A. Gueye, S. Mostarshedi, B. Poussot, F. Nadal, and J.-M. Laheurte, "Matching Evaluation of Highly Coupled Dipoles Quantified by a Statistical Approach," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 68, no. 7, pp. 5044–5051, Jul. 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2977753.
27. C. Moreno and G. Boreman, "Impedance-Matching Technique for an Infrared Folded Dipole Antenna," J. Infrared Millim. Teraher Waves, vol. 42, no. 5, pp. 504–513, May 2021, doi: 10.1007/s10762-021-00784-9.

28. Tang et al., “Enhancing the Directivity of Antennas Using Plasma Rings,” IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 50, no. 11, pp. 4582–4588, Nov. 2022, doi: 10.1109/TPS.2022.3215904.

29. M. Singh, B. Ghosh, and K. Sarabandi, “Theory of Horizontal Dipole Over a Dielectric-Coated Impedance Surface,” 2019 IEEE Int. Symp. Antennas Propag. USNC-URSI Radio Sci. Meet., pp. 2179–2180, Jul. 2019, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888502.

30. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров’я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004.

31. ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с.

32. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028.

33. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров’я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_00-7_15-18_01_ua.php.

34. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Режим доступу [URL:http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972](http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972).

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

36. ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154 с.

37. ДСТУБ В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

38. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885.

39. НАПБА.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К.: МВС України, 2014. 47 с.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ ТА РОЗМІРІВ ДИПОЛЬНОЇ АН- ТЕНИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Виконав: студент 4 курсу, групи ТКР-206
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(цифра і назва напрямку підготовки, спеціальності)


Шрейтер О. С
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н. професор каф. ІРТС

Семенов А.О.
(прізвище та ініціали)

«11» 08 2024 р.

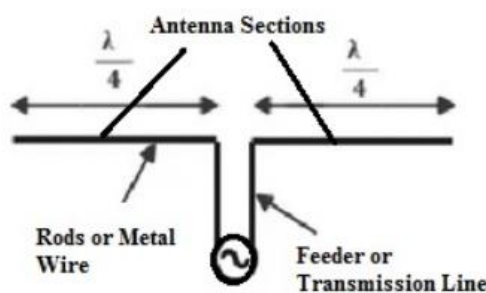


Рисунок 1 – Структура дипольної антени

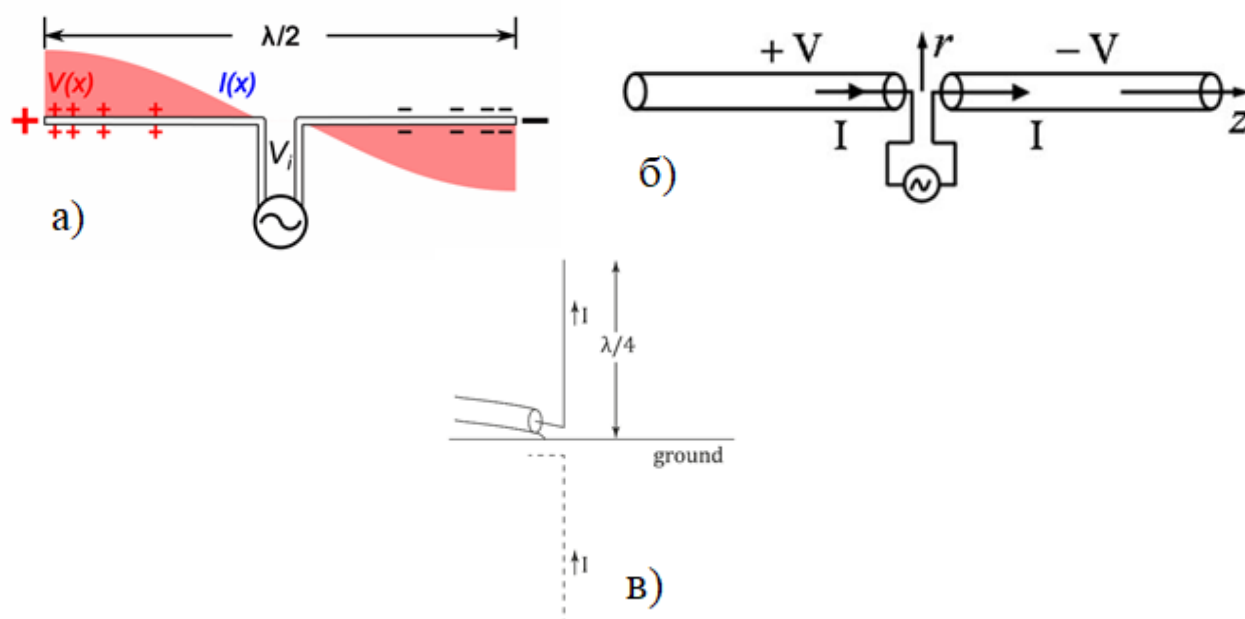


Рисунок 2 – Варіації диполів: а) Передавальний напівхвильовий диполь, що показує напругу і струм завдяки стоячій хвилі на антені; б) короткий диполь; в) Диполь, який випромінює тільки у верхній половині простору

Передавальний напівхвильовий диполь демонструє чітку стоячу хвилю, що забезпечує ефективне випромінювання завдяки максимальній напрузі та струму. Короткий диполь має менш ефективну характеристику через зменшення розміру, що впливає на його резонансні властивості. Диполь, який випромінює тільки у верхній половині простору, оптимізує спрямованість випромінювання, зосереджуючи енергію в конкретному напрямку, що може бути корисним для специфічних застосувань.

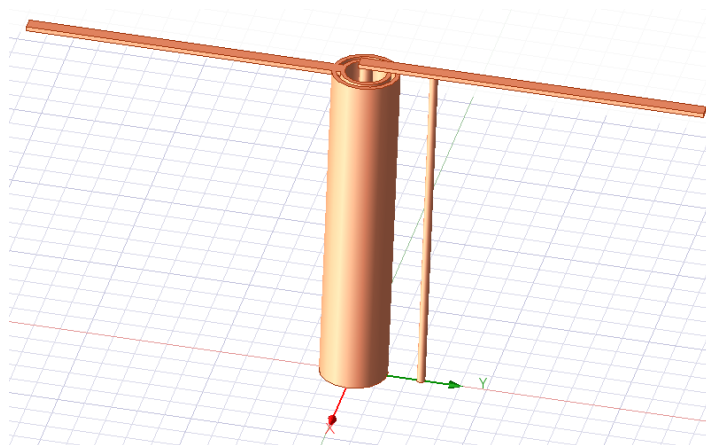


Рисунок 3 – Вигляд стержня після об'єднання другого плеча, заземлення та центрального стержня

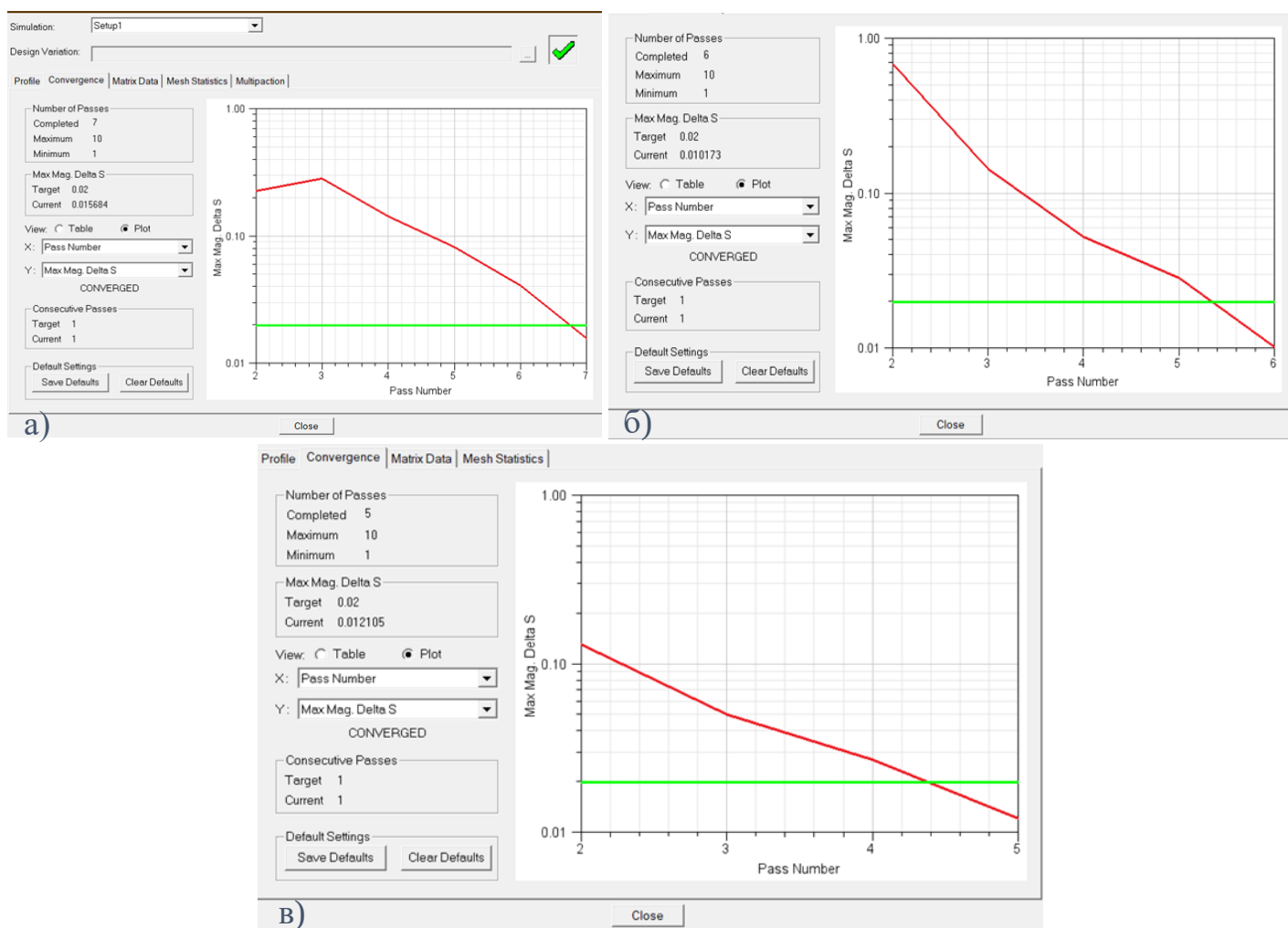


Рисунок 4 – Графіки збіжності: а) досліджуваний розмір дипольної антени; б) зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного; в) Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного

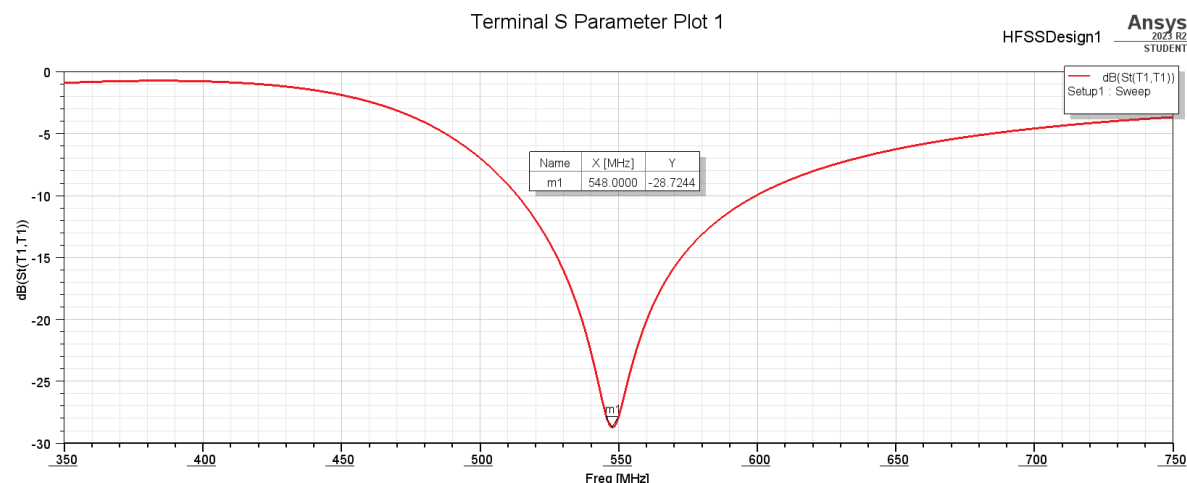


Рисунок 5 - Графік залежності S-параметру від частоти досліджуваного розміру дипольної антени

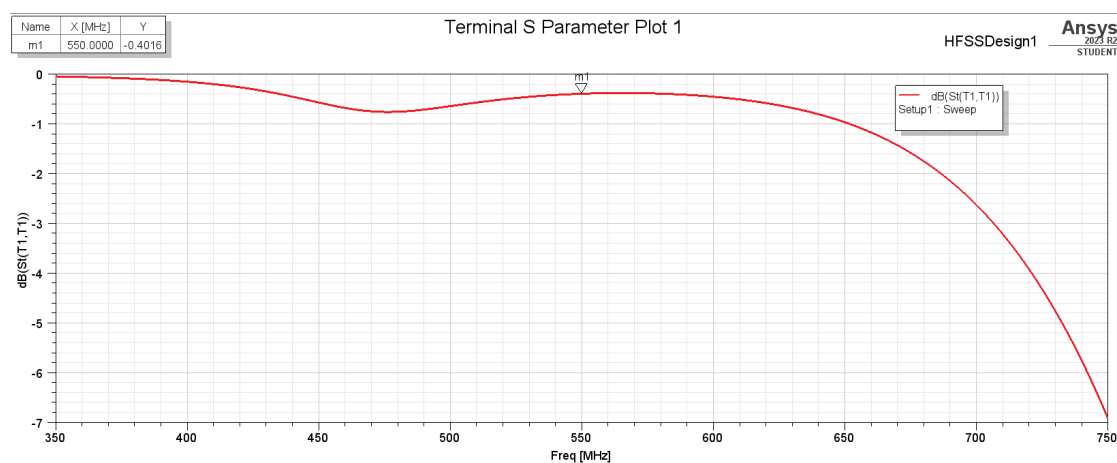


Рисунок 6 - Графік залежності S-параметру від частоти зменшеного у 1.5 рази від розміру досліджуваної дипольної антени

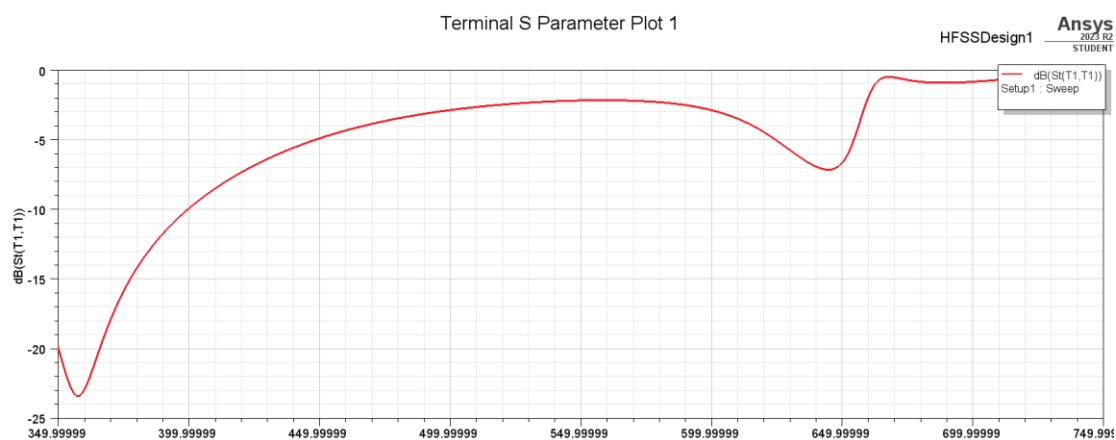


Рисунок 7 - Графік залежності S-параметру від частоти збільшеного у 1.5 рази від розміру досліджуваної дипольної антени

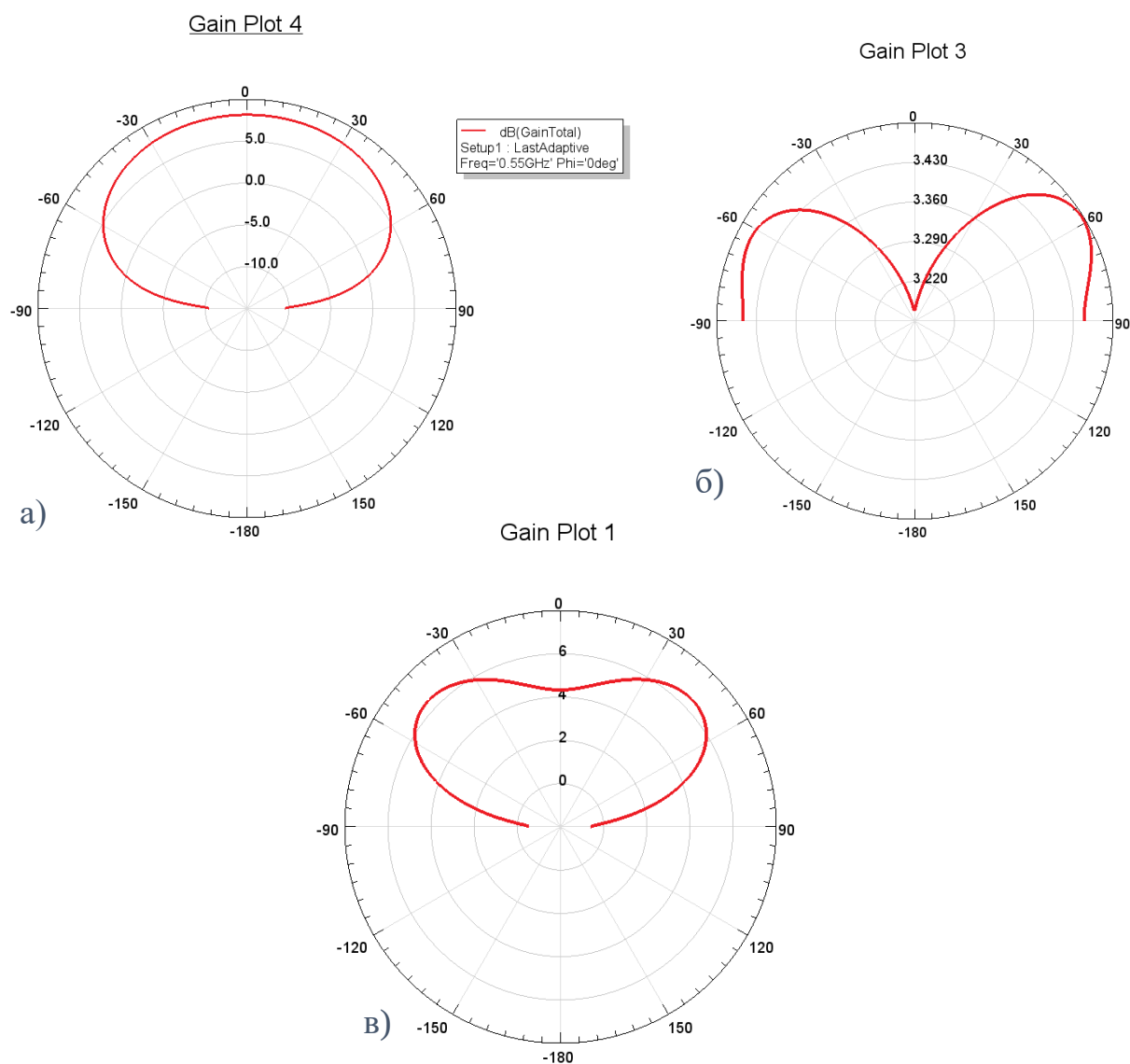


Рисунок 8 – Графік полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 0^\circ$:

а) досліджуваного розміру дипольної антени; б) зменшеного у 1.5 рази розмір від досліджуваного розміру дипольної антени; в) збільшеного у 1.5 рази розмір від досліджуваного розміру дипольної антени

1. Досліджуваний розмір дипольної антени:

- Осьовий діапазон: від -90° до $+90^\circ$;
- Коефіцієнт підсилення: від -10 дБ до +5 дБ;
- Частота: 0.55 ГГц;
- Форма діаграми спрямованості: рівномірна діаграма без значних спадів.

2. Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного:

- Осьовий діапазон: від -150° до $+150^\circ$;
- Коефіцієнт підсилення: від 3.22 дБ до 3.43 дБ;
- Форма діаграми спрямованості: V-подібний малюнок з вираженими піками та мінімумами.

3. Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного

- Максимальний коефіцієнт підсилення: приблизно 6 дБ;
- Форма діаграми спрямованості: майже симетрична діаграма з рівномірним підсиленням на всіх кутах.

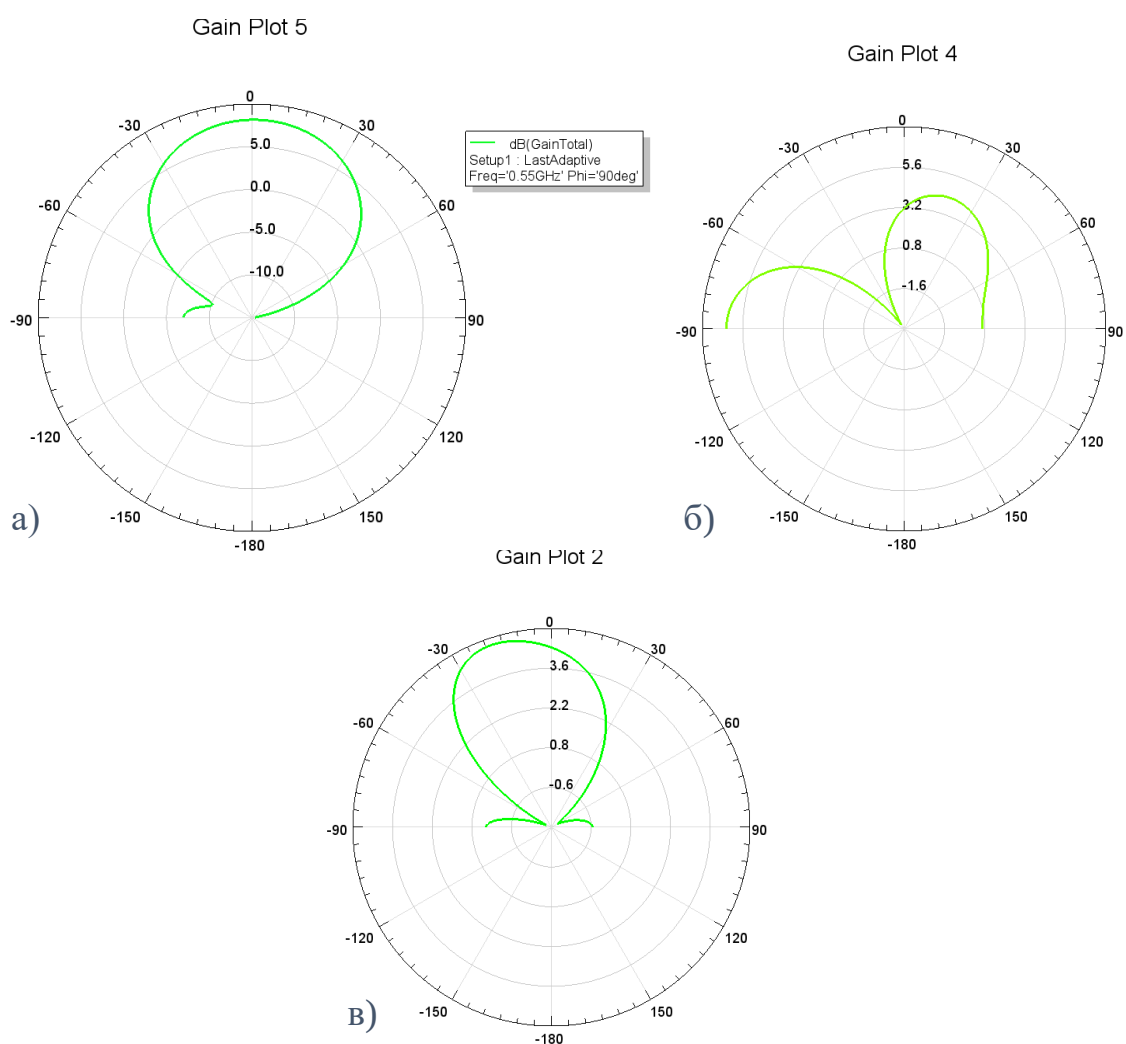


Рисунок 9 – Графік полярного поля з коефіцієнтом підсилення для $\varphi = 90^\circ$:

а) досліджуваного розміру дипольної антени; б) зменшеного у 1.5 рази розмір від досліджуваного розміру дипольної антени; в) збільшеного у 1.5 рази розмір від досліджуваного розміру дипольної антени

1. Досліджуваний розмір дипольної антени:

- Максимальний коефіцієнт підсилення: приблизно 5 дБ;
- Форма: широка діаграма спрямованості, зменшення підсилення на низьких кутах (від -120° до -180°).

2. Зменшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного:

- Максимальний коефіцієнт підсилення: приблизно 5.6 дБ;
- Форма: має вузький лоб підсилення, з виразними зменшеннями підсилення на кутах близько -90° та $+90^\circ$.

3. Збільшений у 1.5 рази розмір дипольної антени від досліджуваного:

- Максимальний коефіцієнт підсилення: приблизно 3.6 дБ;
- Форма: має помірно широкий лоб підсилення, з характерним зменшенням підсилення на низьких кутах (-90° та $+90^\circ$).

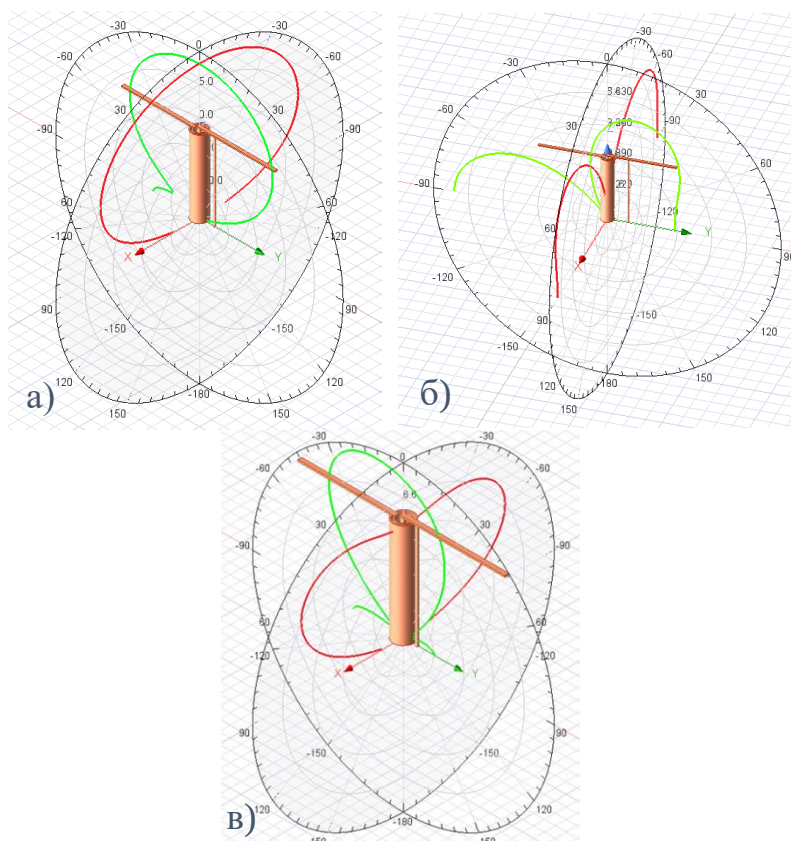


Рисунок 10 – Накладання поля випромінювання для:

- а) досліджуваного розміру дипольної антени; б) зменшеного у 1.5 рази розмір від досліджуваного розміру дипольної антени; в) збільшеного у 1.5 рази розмір від досліджуваного розміру дипольної антени

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (БАКАЛАВРСЬКОЇ) ДИПЛОМ-
НОЇ РОБОТИ**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ ТА РОЗМІРІВ ДИПОЛЬНОЇ АНТЕНИ
НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ**

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Дослідження впливу форми та розмірів дипольної антени на ефективність її випромінювання»

Тип роботи: БДР
(БДР, МКР)

Підрозділ ІРТС, ІЕС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність 99,21% Схожість 0,79%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Олександр ЗВЯГІН
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Олександр ШРЕЙТЕР
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Андрій СЕМЕНОВ
(прізвище, ініціали)