

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

УДК 621.396.6

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри
комп'ютерних технологій у
медицині та телекомунікаціях
к.т.н., доц. Чухов В.В.

« 15 » 12 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему Дослідження спіральної антени

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи

студент 2 курсу, гр.ТРм-22-1

19.12.23 
(дата, підпис)

Ожегов І.Є.

Керівник роботи

к.т.н., доц.

19.12.23 
(дата, підпис)

Чухов В.В.

Житомир
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему Дослідження спіральної антени

Виконав: студент 2 курсу,
групи ТРм-22-1 спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Ожегов І.Є.

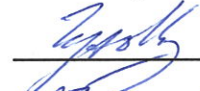
Керівник Чухов В.В.

Рецензент Коломієць Р.О.

Житомир
2023

«Затверджено»

Завідувач кафедри комп'ютерних
технологій у медицині та
телекомунікаціях

 Владислав ЧУХОВ
«27» 10 2022 р.

Завдання **на кваліфікаційну магістерську роботу**

Ожегов Ілля Євгенійович

(прізвище, ім'я по батькові)

1. Тема роботи Дослідження спіральної антени

затверджено наказом по університету від «22» листопада 2023 р. № 679

2. Мета дослідження Дослідити спіральну антену для попереченого випромінювання

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.):

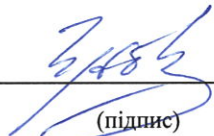
Дослідити спіральну антену на центральній частоті 868 МГц,
смуга частот 800 – 940 МГц

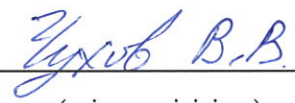
4. Основні задачі дослідження розрахувати конструктивні розміри антени;
розрахувати діаграми направленості; дослідити вплив зміни
відстані між витками спіралі на основні характеристики такої антени

5. Термін подання роботи до захисту грудень 2023 р.

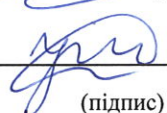
6. Дата видачі завдання «27» жовтня 2022 р.

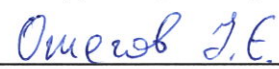
Науковий керівник


(підпис)


(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв


(підпис)


(прізвище, ініціали)

до виконання

АНОТАЦІЯ

Дана кваліфікаційна робота присвячена глибокому аналізу спіральних антен, охоплюючи їх історію, теорію, методику розрахунку та моделювання. Вона розпочинається з історичного огляду, який підкреслює значущість спіральних антен у сфері радіоінженерії, і переходить до детального вивчення їх теоретичних аспектів, з особливим акцентом на поляризацію. Робота далі розглядає методику розрахунку параметрів антен і вибір програмного забезпечення для їх моделювання.

Ключовий фокус праці - розрахунок та моделювання циліндричної спіральної антени з поперечним випромінюванням для використання у системах RFID і IoT на частоті 868 МГц. У роботі детально розглянуто важливість точного визначення параметрів антени для її ефективного використання.

Основною метою є дослідження спіральної антени для поперечного випромінювання.

ABSTRACT

This qualification work is dedicated to a comprehensive analysis of spiral antennas, covering their history, theory, methods of calculation, and modeling. It begins with a historical overview that emphasizes the significance of spiral antennas in the field of radio engineering and then moves to a detailed study of their theoretical aspects, with a special focus on polarization. The work further examines the methodology for calculating antenna parameters and the selection of software for their modeling.

The key focus of the work is the calculation and modeling of a cylindrical spiral antenna with transverse radiation for use in RFID and IoT systems at a frequency of 868 MHz. The work details the importance of precisely determining the antenna parameters for its effective use.

The main objective is to investigate the spiral antenna for transverse radiation.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 64 с., 35 рис., 3 табл., 2 додатки, 17 джерела за переліком посилань. Робота складається з 3 розділів.

У першому розділі проведено аналіз історичного розвитку, різноманітності і режимів роботи спіральних антен, акцентуючи на їх важливості в радіоінженерії та телекомунікаціях. Особлива увага приділена основним режимам роботи циліндричної спіральної антени, таким як нормальний та осьовий режими, і їх застосуванню в різних областях.

Другій розділ присвячений розробленню методики розрахунку параметрів циліндричної спіральної антени та проведено огляд програмного забезпечення для її моделювання.

Третій розділ зосереджений на детальному розрахунку та моделюванні циліндричної спіральної антени на частоті 868 МГц.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1	9
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	9
1.1 Історичний огляд розвитку спіральних антен	9
1.2 Види спіральних антен	11
1.3 Режими роботи циліндричної спіральної антени.....	14
1.4 Напрямки намотування циліндричної спіральної антени.....	15
1.5 Аналіз наукових робіт.....	16
Висновки з розділу	17
РОЗДІЛ 2	18
МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ВИБІР ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	18
2.1 Постановка завдання дослідження	18
2.2 Методика розрахунку ЦСА для нормального режиму роботи.....	18
2.3 Програмне забезпечення для моделювання	23
2.3.1 MATLAB з Antenna Toolbox	24
2.3.2 Ansys HFSS	25
2.3.3 AN-SOF	26
2.3.4 EZNEC	27
2.3.5 4NEC2	28
Висновок з розділу	29
РОЗДІЛ 3	30
РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЦСА	30
3.1 Розрахунок основних параметрів антени для частоти 868МГц	30
3.2 Моделювання ЦСА	32
3.2.1 Створення комп'ютерної моделі ЦСА	32
3.2.2 Симуляція діаграми направленості	35
3.2.3 Симуляція коефіцієнта підсилення, КСХ та імпедансу	38

3.3 Дослідження впливу відстані між витками на характеристики антени	42
3.3.1 Дослідження впливу розміру відстані між витками на імпеданс	43
3.3.2 Дослідження впливу розміру відстані між витками на КСХ та коефіцієнт відбиття	48
3.3.3 Дослідження впливу розміру відстані між витками на коефіцієнт підсилення.....	54
Висновки з розділу	58
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60
ДОДАТОК А.....	62
ДОДАТОК Б	63

ВСТУП

У цій магістерській роботі розглядається застосування спіральних антен, які є ключовим елементом в багатьох сучасних радіочастотних та телекомунікаційних системах. Спіральні антени, відомі своєю компактністю та ефективністю, знаходять широке застосування в різних областях, від військових до комерційних.

Метою цього дослідження є моделювання та аналіз спіральної антени для поперечного випромінювання, з акцентом на оптимізацію її конструктивних параметрів задля досягнення оптимальної діаграми направленості. Основна увага приділяється дослідженню впливу геометричних характеристик спіралі на ширину смуги робочих частот та ефективність випромінювання. Очікується, що розробка такої антени дозволить забезпечити краще покриття та ефективність у сучасних системах зв'язку та радіолокації, особливо в умовах високої щільності сигналів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Історичний огляд розвитку спіральних антен

Історія спіральних антен є свідченням постійного розвитку і інновацій у галузі радіоінженерії, охоплюючи важливі моменти від ранніх теоретичних основ до сучасних технологічних застосувань. Початки спіральних антен сягають 19-го століття, коли вчені, як Джеймс Клерк Максвелл та Генріх Герц, заклали основи для розуміння електромагнетизму. Їх дослідження створили теоретичний фундамент для майбутнього розвитку антенних технологій.

В 20-му столітті відбувся значний прорив у розвитку спіральних антен, особливо завдяки роботам Джона Крауса, який зробив значний внесок у цю область. У 1940-х роках, надихнувшись лекцією про електронні трубки з біжучою хвилею, Джон Краус зацікавився новими можливостями в антенній техніці. В цих трубках, електронний промінь спрямовувався усередину довгої дротяної спіралі, що посилювала хвилі, які рухалися вздовж спіралі. Ця концепція спонукала Крауса до експериментів із застосуванням спіралі як антени. Експериментуючи у своєму домашньому підвалі, він виявив, що спіральна антена здатна генерувати чітко спрямовані випромінювання з круговою поляризацією. Він продовжив дослідження, змінюючи розміри та кількість витків спіралі, і зрозумів, що більша кількість витків призводить до більш чіткого напрямку випромінювання.

Ці ранні відкриття стимулювали подальші дослідження, протягом яких Краус провів ряд вимірювань та розрахунків, результати яких були опубліковані у великій кількості статей. Його роботи сприяли кращому розумінню таких характеристик спіральних антен, як вхідний імпеданс та розподіл струму. Краус також розробив рівняння, придатні для інженерного проектування, і підсумував їх у своїй книзі "Антени" [1].

Спіральні антени швидко знайшли широке застосування у різних областях, включаючи радіоастрономію та супутниковий зв'язок. Краус

застосував ці антени у конструкції радіотелескопа (див. Рисунок 1), який він розробив і побудував разом зі своїми студентами. Також вони використовувались у різноманітних частотних діапазонах, від дуже низьких до високих частот.

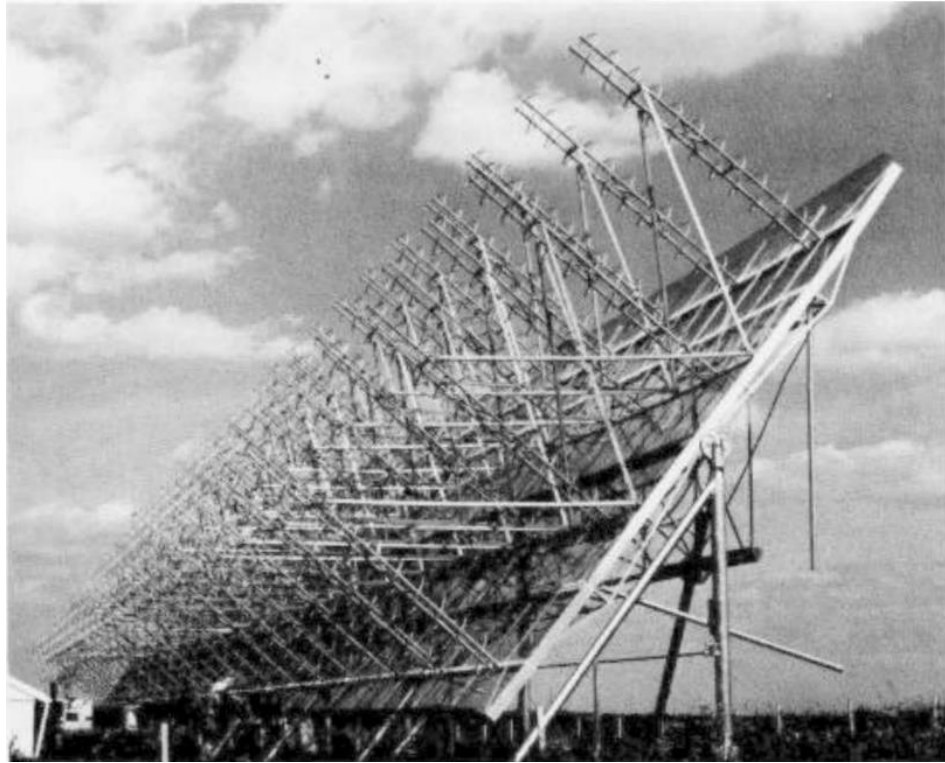


Рисунок 1.1 – Радіотелескоп радіообсерваторії Університету штату Огайо

Ці відкриття та розробки значно сприяли розвитку та розумінню спіральних антен, заклавши фундамент для їх сучасного застосування у радіокомунікаціях та інших областях.

З розвитком нових матеріалів та технологій, спіральні антени перетворились з простих конструкцій на складні системи, які використовуються в сучасних радіолокаційних та комунікаційних пристроях. Це охоплює інновації, такі як комп'ютерне моделювання, для оптимізації конструкцій та покращення їх характеристик. На сьогоднішній день спіральні антени знаходять широке застосування у військових та цивільних сферах, включаючи супутниковий зв'язок та радіоастрономію. Їх здатність забезпечувати кругову поляризацію робить їх незамінними в багатьох сучасних телекомунікаційних системах.

Цей огляд історичного розвитку спіральних антен підкреслює, як поєднання теоретичних відкриттів та практичних інновацій сприяло їх еволюції від простих конструкцій до важливого елемента сучасних комунікаційних систем.

1.2 Види спіральних антен

Спіральна антена - це антена, у якій дріт намотаний у формі спіралі та з'єднаний з заземлюючою пластиною за допомогою лінії живлення. Це найпростіша антена, яка створює хвилі з круговою поляризацією.

Спіральні антени за особливостями конструктивного виконання можна розділити на групи [2]:

- еліптичні;
- циліндричні;
- конічні;
- плоскі;
- виконані на конформній поверхні (наприклад – на півсфері);
- комбіновані структури;
- антени, виконані з провідника з постійним поперечним перерізом (дротова структура) або постійною шириною (смужкова структура);
- антени, виконані з провідника із змінним поперечним перерізом (дротова структура) або шириною (смужкова структура).



Рисунок 1.2 – Приклади спіральних антен за особливостями конструктивного виконання.

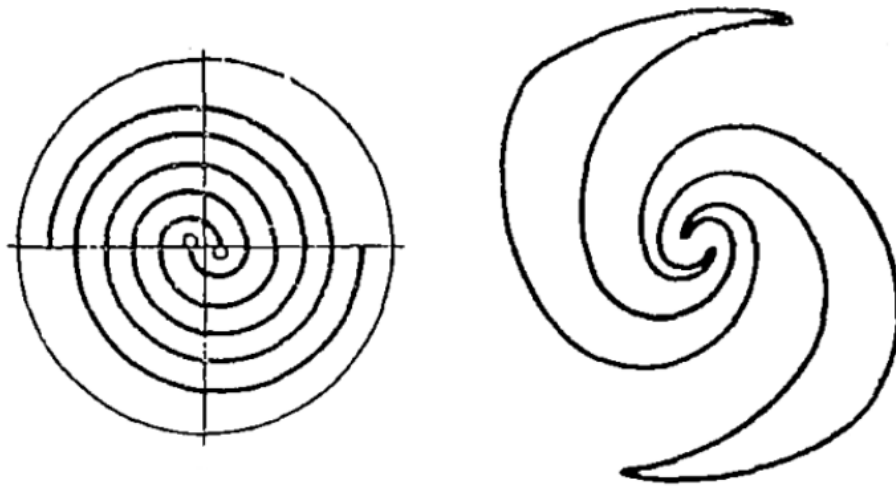


Рисунок 1.3 – Приклади плоских спіральних антен

Геометрія еліптичних спіральних антен визначається габаритами утворюючої спіралі циліндра з поперечним перерізом у вигляді еліпса, для якого відношення піввісей може задаватися в межах $(1...0)$. Якщо відношення піввісей еліпса дорівнює одиниці, то спіральна антена, утворена на основі циліндра з круглим поперечним перерізом називається циліндричною спіральною антеною (ЦСА). Якщо відношення піввісей еліпса дорівнює нулю, то така структура являє собою плоскою спіральною антеною. В інших випадках структура, виконана на циліндрі з еліптичним поперечним перерізом представляє собою еліптичну спіральну антену (ЕСА).

За кількістю використаних випромінювачів спіральні антени діляться на групи:

- однозахідні;
- багатозахідні;
- антенні решітки.

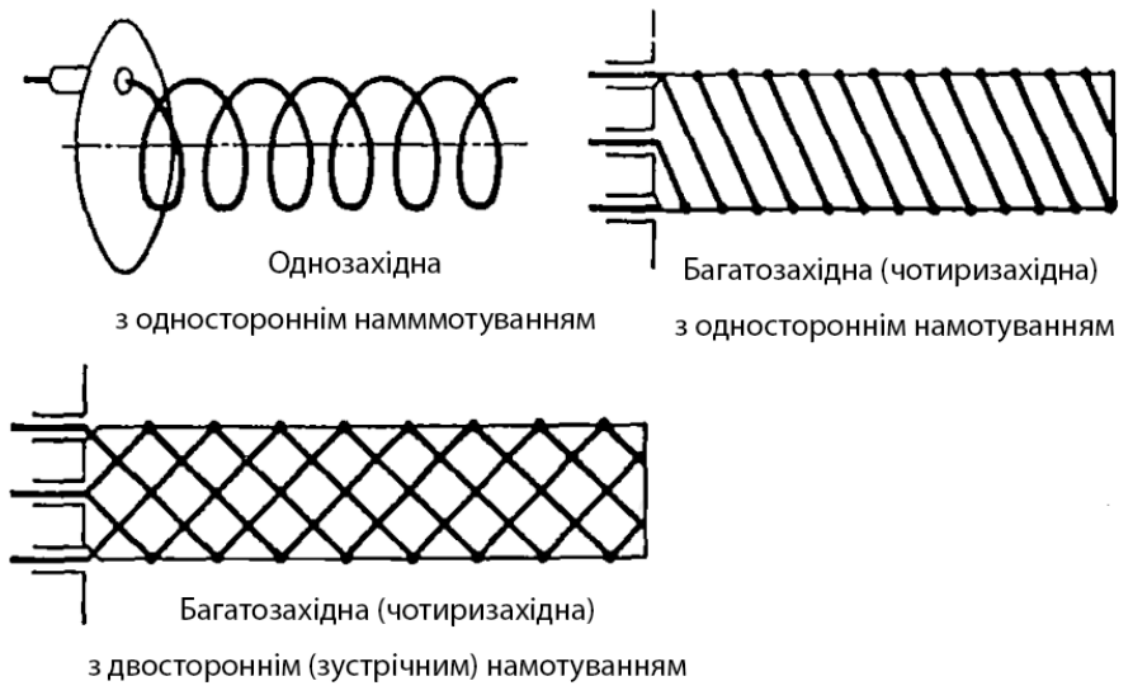


Рисунок 1.4 – Приклад спіральних антен за кількістю використовуваних випромінювачів

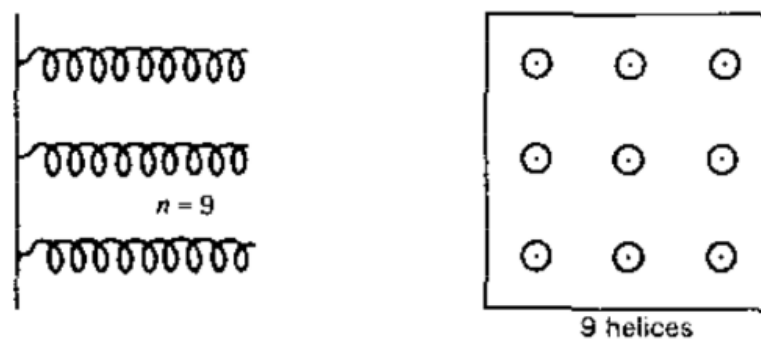


Рисунок 1.5 – Приклад антенної решітки з дев'ятьох спіралей.

Головними перевагами спіральних антен є:

- можливість створення поля випромінювання з поляризацією від лінійної до кругової;
- простота і надійність конструкції;
- відносно невеликі габаритні розміри антени;
- можливість забезпечити необхідні характеристики випромінювання і вхідні характеристики антени за рахунок зміни геометричних параметрів спіралі;

- на основі циліндричних, конічних, напівсферичних спіральних антен можуть бути виконані комбіновані структури (сфероциліндричні, циліндроконічні і т.д.);
- можливість без використання великих екранів забезпечити відносно низький рівень бічного і заднього випромінювання (менш $-15 \dots -10$ дБ в робочому діапазоні частот);
- можливість хорошого узгодження з живильним фідером в широкій смузі частот.

1.3 Режими роботи циліндричної спіральної антени

За принципом роботи спіральні антени поділяють залежно від напрямку випромінювання на антени з поперечним випромінюванням (НМНА — Normal-Mode Helical Antenna) та антени з осьовим випромінюванням (АМНА — Axial-Mode Helical Antenna) [3]. Зазвичай, спрямовані спіральні антени встановлюються над заземлюючою площиною, тоді як всенаправлені конструкції можуть обходитися без неї.

У режимі з поперечним випромінюванням (нормальний режим роботи) спіральної антени діаметр та крок спіралі є малими порівняно з довжиною хвилі. Така антена працює подібно до електрично короткого диполя з характеристиками, еквівалентними до $\frac{1}{4}$ вертикальної хвилі. Діаграма направленості (ДН) випромінювання подібна до цих антен є всенаправленою, з максимальним випромінюванням під прямим кутом до осі спіралі. У однозахідних конструкціях випромінювання лінійно поляризоване вздовж осі спіралі. Такі антени використовуються у компактних пристроях для ручних портативних та мобільних радіостанцій у транспортних засобах, а також у більшому масштабі для телевізійного мовлення. У багатозахідних конструкціях можна реалізувати всенаправлене випромінювання з круговою поляризацією.

У осьовому режимі спіральної антени діаметр і крок спіралі порівнянні з довжиною хвилі. Осьовий режим характеризується тим, що основний

напрямок випромінювання відбувається уздовж осі спіралі. У цьому режимі спіральна антена стає ефективним спрямованим випромінювачем, здатним створювати вузький промінь радіохвиль. Такі антени часто використовуються в системах супутникового зв'язку і радіоастрономії. Осьовий режим був відкритий фізиком Джоном Д. Краусом.

1.4 Напрямки намотування циліндричної спіральної антени

Залежно від способу намотування провідника спіралі, отримана антена буде або з правосторонньою круговою поляризацією (ПСКП) (англ. Right-Hand Circularly Polarized, RHCP), або лівосторонньою круговою поляризацією (ЛСКП) (англ. Left-Hand Circularly Polarized, LHCP). Антена ПСКП не зможе приймати сигнали ЛСКП, тоді як антена ЛСКП не зможе приймати сигнали ПСКП. Це через теоретичну нескінченну втрату неузгодженості дБ між ПСКП і ЛСКП.

Поляризація спіралі може бути визначена шляхом огляду одного з її кінців. Якщо провідник обертається за годинниковою стрілкою, то спіраль є ПСКП, якщо проти годинникової стрілки - то вона є ЛСКП. На рисунку 1.6 показані приклади спіральної антени з ПСКП та ЛСКП.

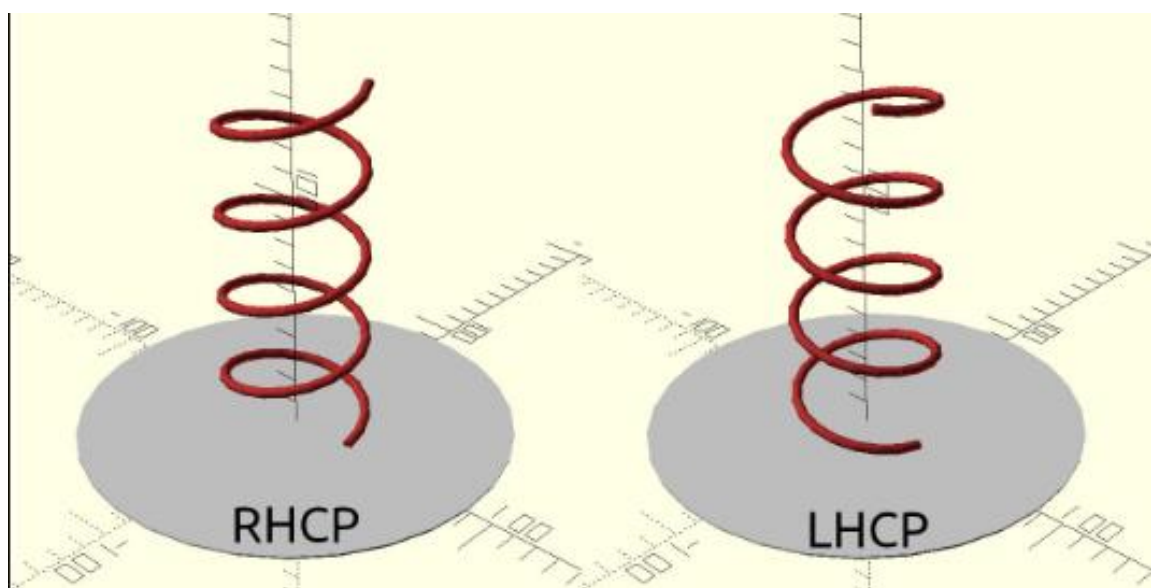


Рисунок 1.6 Види намотування ЦСА.

1.5 Аналіз наукових робіт

Стаття "A Simplified Model for Normal Mode Helical Antennas" авторів Чангі Су, Хайсін Ке та Тодд Хубінг [4] висвітлює спрощену модель для аналізу спіральних антен нормального режиму. Автори описують, як складна геометрія спіральних антен ускладнює їхній дизайн та аналіз, особливо коли вони є частиною більших комплексних структур. Пропонується модель, яка замінює криволінійні спіралі прямими дротами та кільцями, що спрощує моделювання і дозволяє оцінити продуктивність антени без детального моделювання спіралі. Також розглядаються теоретичні розрахунки еквівалентних параметрів і підтвердження валідності моделі за допомогою симуляцій.

Стаття "Normal Mode Helical Antenna on Small Circular Ground Plane" авторства Суман П. Вадкар, Б. Г. Хогаде, С. М. Ратход, Хемант Кумар і Гіріш Кумар [5] досліджує властивості спіральної антени нормального режиму на малій круговій заземлюючій площині. У цій роботі, автори аналізують як розмір заземлюючої площини, так і інші параметри, включаючи товщину проводу і частоту резонансу, впливають на ефективність антени. Вони також розглядають форму заземлюючої площини та її вигин, оцінюючи їх вплив на вхідний імпеданс антени. Ця робота включає як теоретичний аналіз, так і експериментальну перевірку для забезпечення точності отриманих результатів.

Стаття "Increase of Input Resistance of a Normal-Mode Helical Antenna (NMHA) in Human Body Application» авторства Норсіха Заїнудін, Тарік Абдул Латеф, Нарендра Кумар Арідас, Йосіхіде Ямада, Камілія Камардін і Нурул Худа Абд Рахман [6] зосереджена на розвитку пристроїв для моніторингу здоров'я, зокрема на спіральних антенах нормального режиму (NMHA), яка використовується в сенсорах всередині тіла. Вона досліджує причини збільшення вхідного опору R_{in} антени, коли її розміщують у людському тілі. У роботі представлені експериментальні дані та електромагнітні симуляції для розуміння фізичних причин зростання R_{in} . Також обговорюються впливи R_{in}

на смугу пропускання та електричне поле, а результати підтверджуються за допомогою симуляцій.

У роботі "A Design of Very Small Normal Mode Helical Antenna for wireless communication systems» авторства Nguyen Quoe Dinh [7] розглядається дуже мала спіральна антена нормального режиму для бездротових комунікаційних систем, що є актуальною для систем ідентифікації радіочастот (RFID) та систем моніторингу тиску в шинах (TPMS). Дослідження зосереджене на досягненні саморезонансу в антенах менших, ніж $0,03$ довжини хвилі для ефективного випромінювання, де узгодження імпедансу є критичним через низький вхідний опір антени (близько 1 Ом). Розроблено просту структуру з'єднання для узгодження імпедансу зі стандартним 50 -омним коаксіальним кабелем, ефективність якої підтверджено симуляцією та вимірюваннями. Дослідження має значення для застосувань, що вимагають малих розмірів антени та ефективного використання енергії.

Висновки з розділу

Цей розділ проводить аналіз історичного розвитку, різноманітності і режимів роботи спіральних антен, акцентуючи на їх важливості в радіоінженерії та телекомунікаціях. Від ранніх теоретичних основ, закладених Максвеллом та Герцем, до сучасних технологічних застосувань, спіральні антени еволюціонували, знаходячи застосування у радіоастрономії, супутниковому зв'язку та інших сферах. Особлива увага приділена основним режимам роботи ЦСА, таким як нормальний та осьовий режими, і їх застосуванню в різних областях. Також розглянуто сучасні дослідження, які висвітлюють, як постійні інновації та дослідження сприяють розвитку цієї технології, роблячи її незамінною в сучасних комунікаційних системах.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ВИБІР ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Постановка завдання дослідження

Перед виконанням дослідження, поставлено такі завдання:

- 1) Дослідити циліндричну спіральну антену (ЦСА), призначену для поперечного випромінювання (нормальний режим роботи).
- 2) Розрахувати параметри спіральної антени: загальну довжину спіралі, кількість витків, діаметр і крок спіралі, а також відстань між витками.
- 3) Виконати розрахунки та відобразити на полярних координатах нормовані діаграми направленості антени в Е та Н площинах на середніх та крайніх частотах робочого діапазону. На основі цих графіків визначити ширину діаграми направленості в обох площинах, виходячи з рівня половинної потужності.
- 4) Експериментально змінити діаметр спіралі, крок та кількість витків спіральної антени, аналізуючи вплив цих змін на характеристики антени.

2.2 Методика розрахунку ЦСА для нормального режиму роботи

Розміри спіральної структури визначаються відповідно до обраної радіочастоти (або довжини хвилі) розповсюдження. Геометрія однорідної однозахідної спіральної антени представлена на рисунку 2.1. Якщо один виток спіралі розгорнути на плоскій поверхні, то окружність C , відстань S і довжина витка L пов'язані трикутником, вказаним на рисунку 2.1.

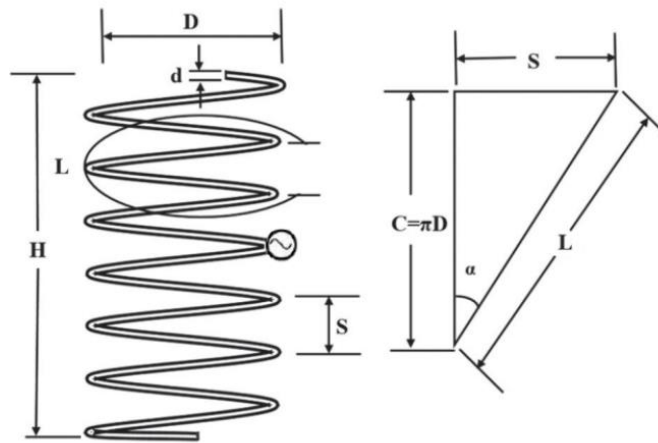


Рисунок 2.1 – Взаємозв'язок розмірів спіралі.

Довжина, діаметр і кількість витків антени позначені як H , D та N відповідно. Діаметр дроту антени позначений як d . Антена живиться у середині намотки спіралі.

Коли окружність спіралі приблизно дорівнює довжині хвилі, домінує осьовий режим випромінювання, але коли окружність значно менша, домінує нормальний режим. На рисунку 2.2 А та В показані спіралі, що випромінюють у обох режимах, тоді як на рисунку 2.2 Б показана спіраль з 4-пелюстковим режимом.

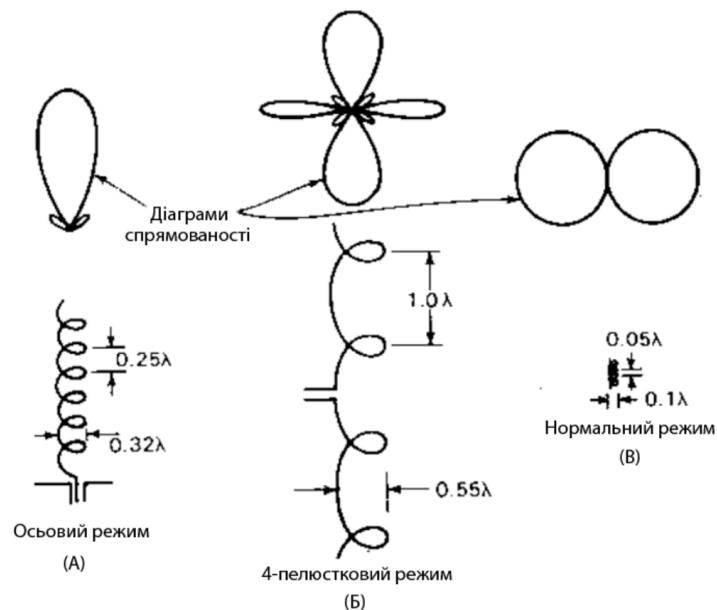


Рисунок 2.2 – Схеми поля осьового, 4-пелюсткового та нормального режимів випромінювання спіральних антен з вказаними відносними розмірами.

Для детальнішого вивчення вимог до випромінювання нормального режиму, розглянемо спіраль, розташовану так, що її вісь відповідає z -вісі, як показано на рисунку 2.3(a). При малих розмірах ($L \ll \lambda$), спостерігається максимальне випромінювання у площині XY , з мінімальним випромінюванням в напрямку Z . Залежно від кута нахилу, спіраль перетворюється: при 0° - на петлю (рисунок 2.3(b)), а при 90° - на диполь (рисунок 2.3(c)).

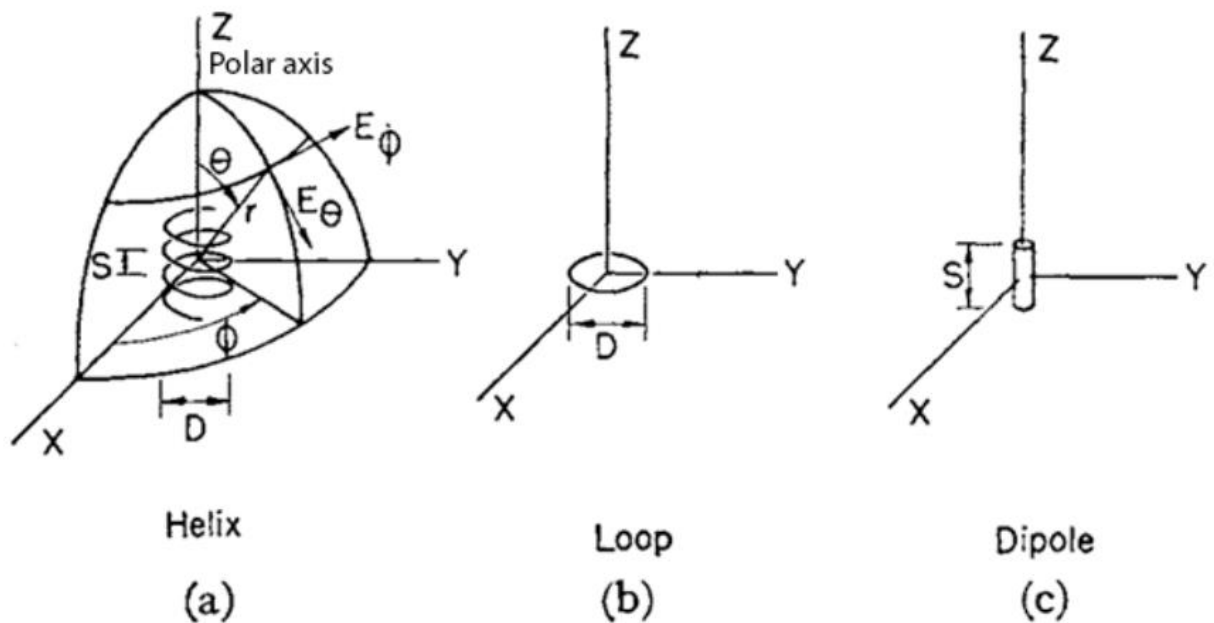


Рисунок 2.3 – Розмірність для спіралі, петлі та диполя

В умовах, коли $L \ll \lambda$, можна розглядати спіраль, як комбінацію послідовно з'єднаних петель та лінійних провідників, як це ілюструється на рисунку 2.3. Припускається, що кожен виток утворює короткий диполь довжиною S , послідовно з'єднаний з малою петлею діаметром D .

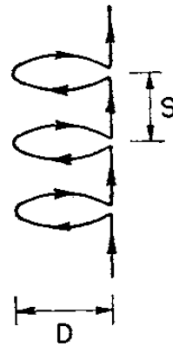


Рисунок 2.3 – Еквівалентна модель спіральної антени

З еквівалентної модель можна зрозуміти, що осьове співвідношення (AR) спіральної антени в нормальному режимі можна виразити як:

$$AR = \frac{E_{\theta}}{E_{\phi}} = \frac{2S\lambda}{\pi^2 D^2}. \quad (2.1)$$

Джон Краус, запропонував позначення S_{λ} для відстані між витками та C_{λ} окружність уявного циліндра, навколо якого намотується спіральний провідник [1]. Обидва ці параметри вимірюються в довжинах хвиль у вільному просторі. Ці позначення допомагають стандартизувати розрахунки та полегшують проектування антен, що працюють на різних частотах. Завдяки цим параметрам можна точно визначити розміри антени для забезпечення її ефективності у вибраному частотному діапазоні.

Параметри спіральної антени, такі як C_{λ} та S_{λ} , можна визначити, використовуючи діаграму, представлену на рисунку 2.4 у Додатку А. Щоб визначити параметри для нормального режиму роботи антени, слід орієнтуватися на заштриховану зону на діаграмі, оскільки саме вона відповідає оптимальним робочим характеристикам:

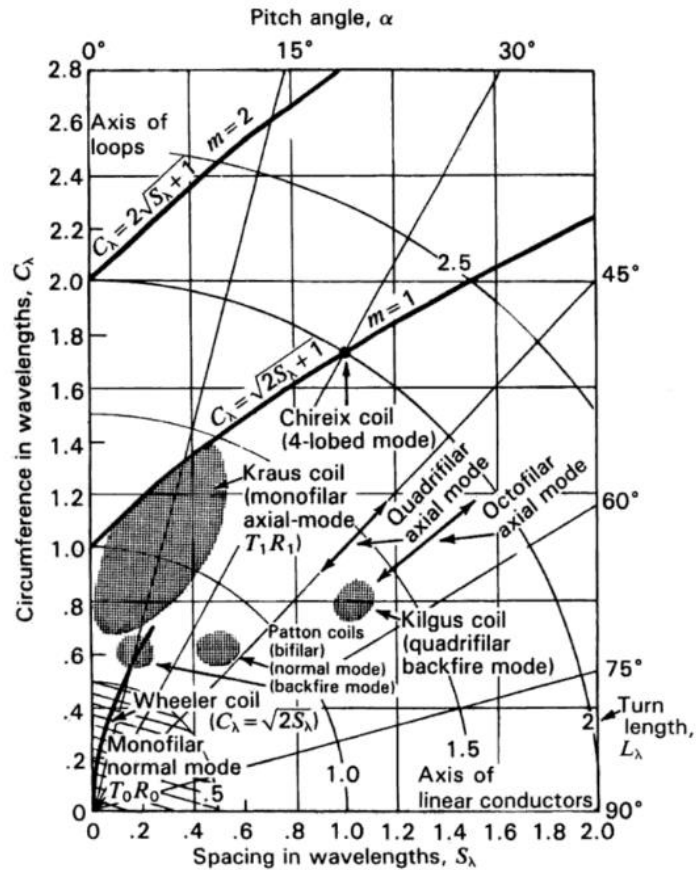


Рисунок 2.4 Розташування різних режимів роботи антени залежно від її розмірів

Щоб розрахувати справжню окружність спіралі використовується наступні формули:

$$C = \pi D, \text{ або } C = \lambda * C_\lambda. \quad (2.2)$$

де $C \ll \lambda$.

З формули 2.2 можна розрахувати діаметр антени:

$$D = \frac{C}{\pi}. \quad (2.3)$$

Справжня відстань між витками розраховується:

$$S = \lambda * S_\lambda \quad (2.4)$$

Довжину хвилі можна отримати з:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.5)$$

де c (м/с) - швидкість світла у вакуумі, f (Гц) - частота.

Кут нахилу витків отримується як:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{S}{C} \right). \quad (2.6)$$

З Рисунок 2.1 довжину одного витка отримують з трикутника, використовуючи теорему Піфагора:

$$L_t = \sqrt{S^2 + C^2}. \quad (2.7)$$

Загальну довжину спірального провідника можна розрахувати за формулою:

$$L_H = L_t * N, \quad (2.8)$$

де N - це кількість витків.

Таким чином, осьову довжину (тобто загальну довжину) спіралі можна обчислити:

$$H = NS, \quad (2.9)$$

де N - це кількість витків.

2.3 Програмне забезпечення для моделювання

У сучасному світі швидкісних комунікацій та високочастотної електроніки, моделювання антен стає все більш актуальним і вимогливим завданням. Циліндричні спіральні антени (ЦСА) є одним з ключових елементів у багатьох радіочастотних системах, включаючи радіозв'язок, радіолокацію та супутникові технології. Вона вирізняється своїми широкосмуговими характеристиками та компактністю, що робить її ідеальною для застосувань, де необхідна висока функціональна гнучкість.

Розробка та оптимізація ЦСА вимагають застосування спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє точно моделювати електромагнітні процеси та передбачити робочі характеристики антени ще на етапі її проектування. Вибір програми є критичним етапом, оскільки він впливає на

точність моделювання, швидкість обчислень та зручність роботи інженера-проектувальника.

Цей підрозділ присвячений аналізу та порівнянню доступного програмного забезпечення для моделювання ЦСА. Ми розглянемо основні функціональні можливості, інтерфейси, методи моделювання, які вони використовують, щоб визначити оптимальний інструмент для наших досліджень.

Розглядатимемо такі програмні продукти як MATLAB з Antenna Toolbox, Ansys HFSS, AN-SOF та 4NEC2, кожен з яких має свої унікальні переваги та особливості. Вибір відповідного програмного забезпечення є ключовим для успішного моделювання антен та впровадження результатів моделювання у практичні розробки.

2.3.1 MATLAB з Antenna Toolbox

MATLAB з Antenna Toolbox - це потужний інструмент для проектування, аналізу та візуалізації антен та антенних масивів. Він надає інтерактивне середовище з багатим набором бібліотек, що містять різноманітні моделі антен, включаючи спіральні антени. Antenna Toolbox дозволяє аналізувати характеристики антен, такі як діаграми направленості, імпеданс та поляризація [11, 12].

Основні можливості цього інструменту включають:

- Широкий спектр моделей антен для швидкого прототипування.
- Візуалізація характеристик антен, таких як діаграми направленості та поляризації.
- Інтеграція з MATLAB для подальшого аналізу та обробки даних.

Недоліки MATLAB з Antenna Toolbox:

1. Висока Вартість: MATLAB, особливо з додатковими інструментами, як Antenna Toolbox, може бути дорогим, особливо для некомерційних користувачів або студентів, які не мають доступу до академічних ліцензій.

2. Складність для Новачків: MATLAB має досить крутий кривий навчання, особливо для тих, хто не знайомий з його програмувальним середовищем та мовою.

3. Обмеженість у Спеціалізації: Хоча Antenna Toolbox пропонує широкий спектр функцій для моделювання антен, він може не включати деякі специфічні або дуже вузькоспеціалізовані типи антен, які доступні в інших, більш спеціалізованих програмах.

4. Обмеження Ресурсів Комп'ютера: Високий рівень деталізації моделювання в MATLAB може вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо для складних симуляцій.

5. Залежність від Програмування: Для ефективного використання MATLAB і Antenna Toolbox користувачі повинні мати навички програмування, що може бути бар'єром для деяких інженерів та дизайнерів, які віддають перевагу більш інтуїтивним графічним інтерфейсам.

6. Відсутність Підтримки Деяких Форматів Файлів: MATLAB може не підтримувати деякі індустріальні стандарти або формати файлів, що використовуються в інших програмах для моделювання антен.

2.3.2 Ansys HFSS

Ansys High Frequency Structure Simulator (HFSS) є високопродуктивним програмним забезпеченням для електромагнітного моделювання, яке широко використовується у галузях проектування антен та високочастотної інженерії. Ось короткий огляд головних переваг та недоліків цього інструменту [13]:

Переваги Ansys HFSS:

1. Висока Точність Моделювання: Завдяки методу кінцевих елементів (MCE), HFSS забезпечує точне моделювання електромагнітних полів.

2. Мультифізичний Аналіз: Інтеграція з іншими продуктами Ansys дозволяє проводити комплексний аналіз, залучаючи різні фізичні процеси.

3. Ефективність та Гнучкість: Програма підтримує розширені функції для параметричного моделювання та оптимізації дизайну.

4. Інтуїтивний Інтерфейс та Візуалізація: HFSS пропонує зрозумілий інтерфейс і розширені візуалізаційні можливості, спрощуючи аналіз результатів.

Недоліки Ansys HFSS:

1. Висока Вартість: Для багатьох користувачів основним недоліком є висока вартість ліцензії.
2. Складність і Крутий Кривий Навчання: Новачкам може бути складно освоїти всі функції програми.
3. Вимогливість до Обчислювальних Ресурсів: Для ефективного моделювання потрібен потужний апаратний забезпечення.
4. Тривалість Обчислень: Складні моделі можуть вимагати значного часу для обчислень.

2.3.3 AN-SOF

AN-SOF є програмним забезпеченням для моделювання антен, яке використовує метод моментів для аналізу провідних структур. Ось короткий огляд його основних переваг та недоліків [14]:

Переваги AN-SOF:

1. Точне моделювання провідних антен: AN-SOF ефективно моделює провідні антени, включаючи диполі, спіралі та петлеві антени.
2. Гнучкість конструкцій: Програма підтримує різноманітність конструкцій антен, що робить її зручною для широкого спектра застосувань.
3. Інтуїтивний інтерфейс: AN-SOF пропонує зрозумілий графічний інтерфейс, який полегшує процес проектування та аналізу.
4. Розширені візуалізаційні можливості: Програма надає детальні візуалізації розподілу струмів і полів, що допомагає у зрозумінні поведінки антени.

Недоліки AN-SOF:

1. Обмеження у моделюванні: AN-SOF зосереджений переважно на провідних антенах, тому може не підходити для деяких типів антен, які вимагають складніших електромагнітних аналізів.

2. Вимоги до навчання: Хоча інтерфейс є дружнім, необхідно зрозуміти основи антенної інженерії для ефективного використання програми.

3. Обмеженість функціональності: У порівнянні з більш комплексними програмами, AN-SOF може мати обмежені функціональні можливості, особливо у площині мультифізичного моделювання.

2.3.4 EZNEC

EZNEC є програмним забезпеченням для моделювання антен, розробленим Роєм Левалленом (W7EL). Воно базується на методі чисельного електромагнітного коду (Numerical Electromagnetics Code - NEC) і призначене для допомоги радіоаматорам та професіоналам у проектуванні антен. Програма дозволяє користувачам моделювати різноманітні типи антен, аналізувати їх характеристики та оптимізувати дизайн [15].

Переваги EZNEC:

1. Легкість використання: Програма має інтуїтивний інтерфейс, який полегшує процес моделювання для користувачів різного рівня підготовки.
2. Підтримка Різних Типів Антен: EZNEC може моделювати широкий спектр антенних конструкцій, включаючи диполі, Yagi-антени та інші.
3. Доступність ресурсів та підтримки: Програма супроводжується якісними ресурсами для навчання та підтримкою з боку розробника.
4. Демо-Версія: EZNEC пропонує безкоштовну демо-версію з високою функціональністю, що є корисним для більшості аматорських проектів антен.

Недоліки EZNEC:

1. Обмеження у складності Моделей: У деяких випадках EZNEC може бути обмеженим у можливостях моделювання дуже складних антенних систем.
2. Візуальні Обмеження: Порівняно з деякими сучасними програмами, EZNEC може мати обмежені візуальні можливості.

2.3.5 4NEC2

4NEC2 є відкрито-джерельним програмним забезпеченням для моделювання антен, базованим на популярному методі чисельного електромагнітного коду (Numerical Electromagnetics Code - NEC) [16]. Ця програма широко використовується радіоаматорами та професіоналами для аналізу та оптимізації антенних конструкцій. Ось основні переваги та недоліки 4NEC2:

Переваги 4NEC2:

1. Безкоштовність та Відкритий Код: 4NEC2 є безкоштовним і має відкритий код, що робить його доступним для широкого кола користувачів.
2. Гнучкість у Моделюванні: Програма дозволяє моделювати широкий спектр антенних типів, включаючи диполі, Yagi-антени, петлеві антени тощо.
3. Інтуїтивний Графічний Інтерфейс: 4NEC2 пропонує графічний інтерфейс користувача, що полегшує процес моделювання та аналізу.
4. Детальний Аналіз та Візуалізація: Програма надає розширені можливості для аналізу характеристик антен, включаючи діаграми направленості, імпеданси та інше.

Недоліки 4NEC2:

1. Обмеження Методу NEC: Оскільки 4NEC2 базується на NEC, вона має певні обмеження цього методу, наприклад, у складності моделювання деяких типів структур.
2. Вимоги до навчання: Для нових користувачів може бути складно освоїти всі аспекти програми, особливо якщо вони не знайомі з основами антенної інженерії.
3. Обмеження в Обробці Великих Даних: 4NEC2 може не бути оптимальним вибором для дуже великих або складних антенних систем, оскільки це може призвести до довгих часів обчислень.

Загалом, 4NEC2 є цінним інструментом для тих, хто шукає економічно ефективно та гнучке рішення для моделювання антен, хоча його потенціал може бути обмежений у певних складних сценаріях.

Висновок з розділу

У цьому розділі була розроблена методика розрахунку параметрів циліндричної спіральної антени та проведено огляд програмного забезпечення для її моделювання. Після аналізу різних програм для моделювання циліндричних спіральних антен (ЦСА). За результатами детального огляду можливостей та функціоналу програмного забезпечення, включаючи MATLAB з Antenna Toolbox, Ansys HFSS, AN-SOF та EZNEC, було вирішено вибрати 4NEC2. Цей вибір обумовлений його відкритим кодом, гнучкістю в моделюванні, інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом та здатністю до детального аналізу, незважаючи на деякі обмеження методу NEC та обробки даних для складних антенних систем.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЦСА

У цьому розділі буде проведено детальний розрахунок параметрів та моделювання циліндричної спіральної антени на частоту 868 МГц. Частота 868 МГц активно використовується в системах радіочастотної ідентифікації (RFID), бездротовому зв'язку, включаючи Інтернет речей (IoT), та у медичних застосуваннях через свою здатність до стабільної роботи на значних відстанях із низьким рівнем шуму. Обрання саме цієї частоти обумовлене її широким застосуванням у сучасних технологіях, а також оптимальними умовами для передачі даних у різних середовищах.

Після визначення параметрів, ми використаємо комп'ютерне моделювання для аналізу характеристик антен. Цей етап включає в себе використання програмного забезпечення для електромагнітного моделювання, що дозволяє нам візуалізувати поля та розподіл електромагнітних хвиль, а також оцінити ефективність антени в різних робочих режимах.

3.1 Розрахунок основних параметрів антени для частоти 868МГц

Використовуючи методику розрахунків з розділу 2, розраховано спіральну антену для частоти 868 МГц з кількістю витків 6,5 та діаметром дроту 1 мм. Значення S_λ (відстань між витками спіралі) та C_λ (окружність уявного циліндра), які є ключовими для визначення геометричних параметрів антени, були взяті з діаграми Крауса (Додаток А).

$$S_\lambda = 0,0232, \quad C_\lambda = 0,0364.$$

Довжину хвилі розраховуємо за формулою 2.5:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{0,868 * 10^9} = 0,3456 = 345,6 \text{ мм.}$$

Щоб розрахувати справжню окружність спіралі використовуємо формулу 2.2:

$$C = \lambda * C_\lambda = 345,6 * 0,0364 = 12,57 \text{ мм.}$$

З формули 3.3 розраховуємо діаметр антени:

$$D = \frac{C}{\pi} = \frac{12,57}{3,14} = 4 \text{ мм.}$$

Потім розраховуємо справжня відстань між витками за формулою 2.4:

$$S = \lambda * S_\lambda = 345,6 * 0,0232 = 8 \text{ мм.}$$

Кут нахилу витків розраховуємо за формулою 2.6 :

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{S}{C}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{8}{12,57}\right) = 32,48^\circ.$$

За формулою 3.7 розраховуємо довжину одного витка:

$$L_t = \sqrt{S^2 + C^2} = \sqrt{8^2 + 12,57^2} = 14,90 \text{ мм.}$$

Загальну довжину спірального провідника можна розрахувати за формулою 2.8:

$$L_H = L_t * N = 14,9 * 6,5 = 96,85 \text{ мм.}$$

Таким чином, осьову довжину (тобто загальну довжину) спіралі можна обчислити:

$$H = N * S = 6,5 * 8 = 52 \text{ мм.}$$

Всі результати розрахунків заніс у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків

N	f_0 , МГц	λ , мм	D, мм	C, мм	S, мм	H, мм	α , град.	L_t , мм	L_h , мм	d, мм
6.5	868	345,6	4	12,57	8	52	32,48	14.9	96,86	1

Застосування цих розрахунків є кроком для створення точної моделі спіральної антени в програмному забезпеченні 4пес2. Це дозволяє нам не лише визначити геометричні параметри антени для частоти 868 МГц, але й створити детальну модель для подальшого аналізу та дослідження її характеристик. Використання 4пес2 для моделювання сприяє глибшому розумінню робочих параметрів антени та дозволяє провести розрахунки інших важливих

параметрів, таких як діаграма направленості, коефіцієнт стоячої хвилі та ефективність.

3.2 Моделювання ЦСА

У підрозділі 3.1 були визначені параметри циліндричної спіральної антени (табл. 3.1), такі як довжина, діаметр, кількість витків та інші основні характеристики. З метою подальших досліджень та аналізу антени було розроблено комп'ютерну модель цієї антени за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення 4nec2.

3.2.1 Створення комп'ютерної моделі ЦСА

Для створення комп'ютерної моделі циліндричної спіральної антени були виконані наступні кроки:

1. Завантаження та встановлення програмного забезпечення 4nec2 (рис. 3.1) та підготовка робочого середовища [16].

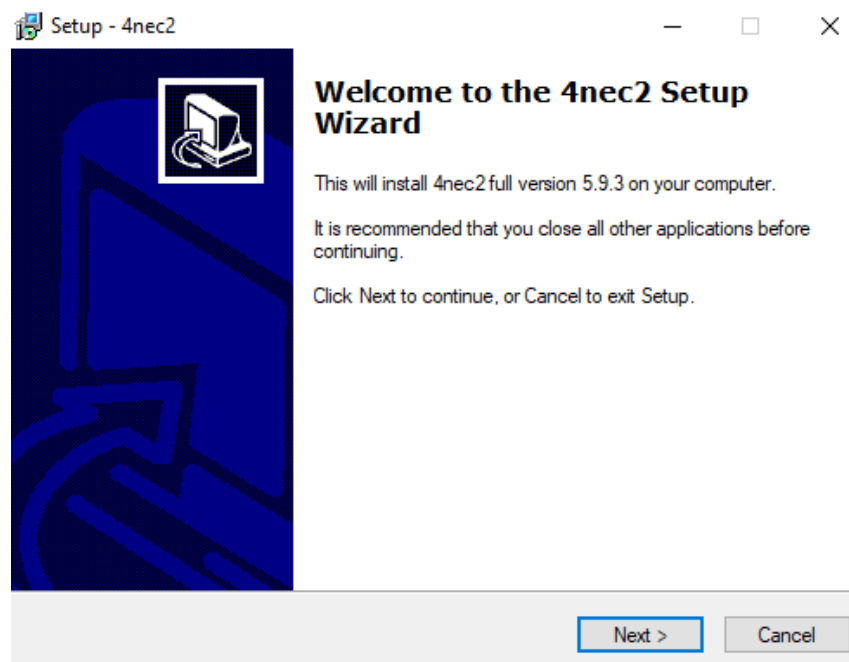


Рисунок 3.1 – Встановлення програмного забезпечення 4nec2

2. Створення нового NEC-file та введення геометричних параметрів антени, таких як довжина спіралі, радіуси витків, кількість витків та інші необхідні параметри.

У програмі 4NEC2 існує кілька варіантів налаштувань, які можна знайти в меню «Налаштування». Вони включають:

- Редактор Notepad
- Редактор NEC
- Редагування геометрії
- Редактор NEC (нова версія)

Простий текстовий редактор Notepad у Windows є найкращим вибором для швидкого внесення та тестування змін і вдосконалень. Важливо пам'ятати про необхідність вибору опції «Всі файли» у типі файлу та додавання розширення '.NEC' до назви файлу. Також важливо знати, що NEC вимірює всі введені розміри в метрах.

Система вхідних файлів NEC базується на принципі послідовності інструкцій, відомих як «Карти» (англ. Cards). Цей метод використовувався від самого початку, коли дані зберігалися на перфокартах IBM, організованих у ряди та стовпці. Ця система зберігання залишається актуальною і сьогодні.

В таблиці 3.2 наведено список основних команд які використовуються в NEC файлі.

Таблиця 3.2 – Список основних команд

CM - Коментар	Ця команда використовується для додавання пояснювального тексту в коді, що не впливає на виконання програми.
` - Апостроф	Апостроф розміщений перед текстом, визначає початок рядка коментаря.
CE - Кінець коментаря	Ця команда позначає закінчення розділу коментарів.
SY - Символи	Цією командою оголошують змінні, які визначають різні фактори, такі як фізичні величини або рівняння, необхідні для розрахунків.
GW - Геометрія Проводу	Описує деталізацію проводів антени, включаючи їх розміри та орієнтацію.
GM - Геометричне переміщення	Використовується для модифікації структури антени шляхом обертання, переміщення або копіювання її цілком або частково.

GE - Кінець геометрії	Вказує на завершення введення геометричної частини моделі.
LD - Навантаження	Присвоює додаткові компоненти (опір, індуктивність, ємність) певним сегментам антени для моделювання її електричних властивостей.
FR - Частота	Встановлює робочу частоту антени або діапазон частот для сканування.
EK - Розширене ядро	Активує додаткові алгоритми програми для точного моделювання характеристик тонких проводів.
EX - Збудження	Застосовується для імітації подачі сигналу на антену.
EN - Кінець	Позначає кінцеву точку NEC-файлу, сигналізуючи про завершення коду.

На рисунку 3.2 зображено створений NEC файл з усіма параметрами антени. Повний текст NEC файлу наведено у додатку Б.

```

SY nsh=30
SY dh=0.004
SY rh=dh/2
SY d=0.001
SY r=d/2
SY n=6.5
SY space=0.008
SY len=n*space
SY xz=0.018
SY nsw=3
SY freq=868.0
GH 1 nsh space len rh rh rh rh r
GM 0 0 0 0 0 0 0 xz 0
GW 15 nsw rh 0 0 rh 0 xz r
GE 1
LD 5 0 0 0 58000000
GN 1
EK
EX 0 15 2 0 1 0 0 0
FR 0 0 0 0 freq 0
EN

```

Рисунок 3.2 – NEC файл для ЦСА на частоту 868 МГц

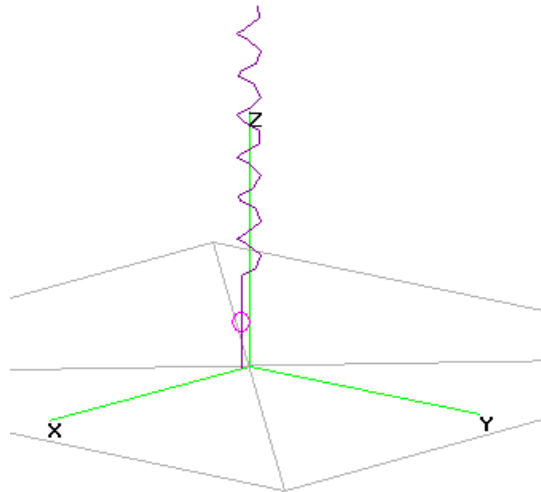


Рисунок 3.3 – 3Д модель циліндричної спіральної антени

3.2.2 Симуляція діаграми направленості

Після створення комп'ютерної моделі циліндричної спіральної антени, наступним кроком є симуляція її діаграми направленості. Результати симуляції наведено на рисунках 3.4 та 3.5.

Для об'єктивної оцінки ефективності циліндричної спіральної антени, її діаграми направленості будуть кореляційно аналізуватися порівняно з діаграмами направленості ідеального диполя. Такий підхід обрано через те, що ідеальний диполь, у своїй чистій теоретичній моделі, представляє діаграму направленості, яка найближче апроксимує характеристики ізотропної антени. Ця близькість до ізотропного випромінювання робить ідеальний диполь відмінним еталоном для порівняння та визначення властивостей направленої антенної системи, надаючи тверду основу для аналізу й можливих висновків щодо вдосконалення конструкції антени.

Діаграма направленості для ідеальної дипольної антени, яку часто називають "півхвильовим диполем", має вигляд вісімки в тривимірному просторі. У двовимірному поданні, якщо дивитися на антену збоку, діаграма направленості виглядатиме як коло, оскільки диполь випромінює

електромагнітні хвилі однаково у всіх напрямках у площині, перпендикулярній до його осі.

У площині, яка проходить через ось диполя (так звана Е-площина), діаграма буде виглядати як розріз вісімки, де головна пелюстка випромінювання спрямована перпендикулярно до осі диполя і не має випромінювання у напрямку осі (тобто, на кінцях диполя). Це відображається як круг, що стиснутий по лінії осі диполя. Тобто, якщо ось диполя спрямована вертикально, то головні пелюстки випромінювання будуть спрямовані горизонтально.

У горизонтальній площині (Н-площина), що проходить перпендикулярно до осі диполя, діаграма направленості буде круговою, показуючи, що диполь випромінює рівномірно у всі сторони на одній і тій же висоті що і сам диполь.

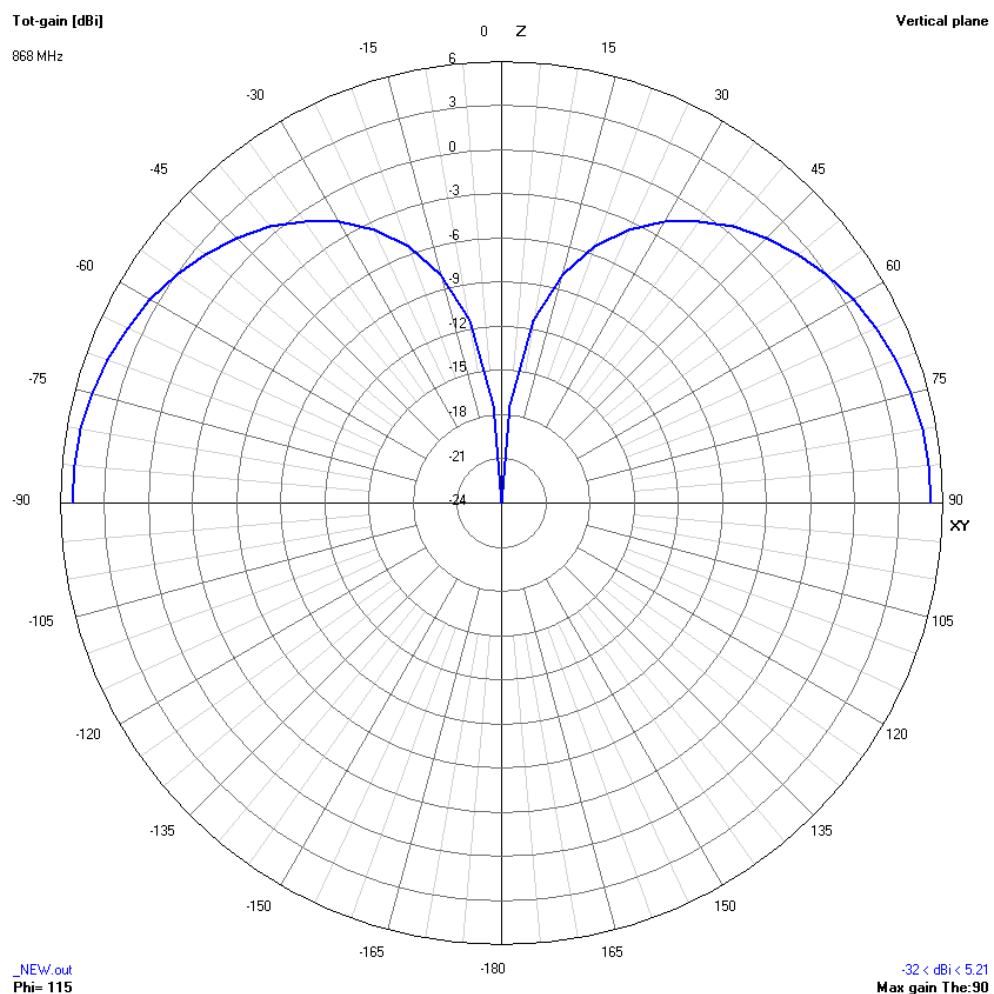


Рисунок 3.4 – Діаграма направленості ЦСА в вертикальній площині

Аналізуючи діаграму направленості (рис. 3.4) в вертикальній площині, ми бачимо, що ЦСА демонструє дві явні головні пелюстки, розташовані симетрично відносно осі Z. Ця конфігурація нагадує характеристику ДН ідеальної дипольної антени, яка також має дві головні пелюстки у вертикальній площині. Втім, слід зазначити, що в ідеальній дипольній антені, пелюстки випромінювання мають більш рівномірний розподіл потужності та більш виражений кут випромінювання, що розширюється від осі.

У горизонтальній площині (рис. 3.5), нижня діаграма направленості представляє всенаправлену характеристику, що є характерним для дипольної антени. Це свідчить про те, що у горизонтальному напрямку, ЦСА випромінює сигнал із схожим рівномірним розподілом, як і ідеальний диполь.

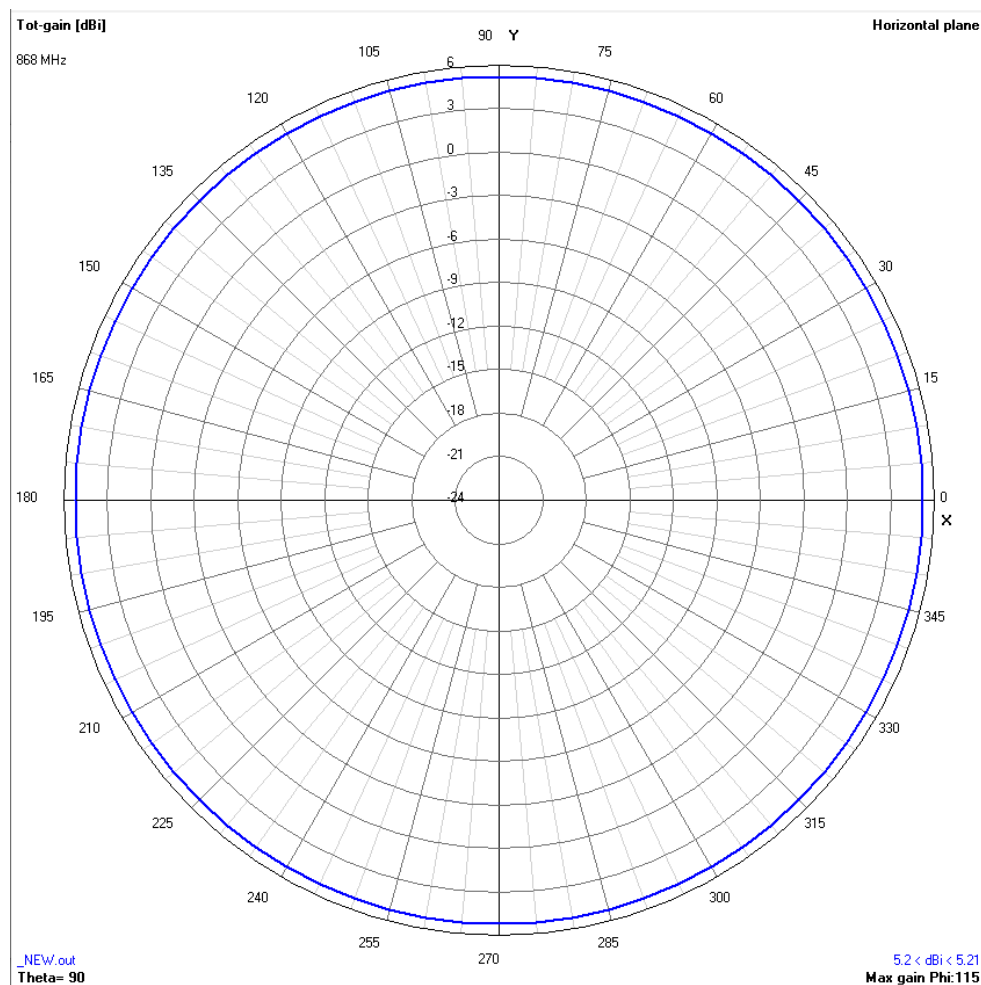


Рисунок 3.5 – Діаграма направленості ЦСА в горизонтальній площині

Висновки, отримані з цього порівняльного аналізу, підкреслюють схожість у випромінювальних характеристиках між циліндричною

спіральною антеною та ідеальною дипольною антеною в обох площинах. Це може вказувати на потенційну придатність циліндричної спіральної антени для застосувань, де традиційно використовують дипольні антени. Однак, необхідно враховувати відмінності у конструкції та інші фактори, які можуть впливати на робочі параметри антен у реальних умовах експлуатації.

3.2.3 Симуляція коефіцієнта підсилення, КСХ та імпедансу

У рамках розробки та оптимізації характеристик циліндричної спіральної антени, ключовим аспектом є точне моделювання її електричних параметрів, що включає коефіцієнт підсилення, КСХ та імпеданс. Симуляційний аналіз цих параметрів забезпечує глибоке розуміння робочих характеристик антени і сприяє вдосконаленню її конструкції та ефективності.

На графіку (рис. 3.6) представлено дані коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) для циліндричної спіральної антени у частотному діапазоні від 800 МГц до 940 МГц. З графіка видно, що КСХ найнижчий близько центральної робочої частоти 868 МГц, де його значення становить приблизно 1,79, що є дуже близьким до оптимального значення 1. Це вказує на добре узгодження імпедансу антени з лінією живлення, призначеною для 50 Ом.

Такі результати симуляції свідчать про те, що антена має високу ефективність на цій частоті, що робить її підходящою для використання в системах, які працюють на цій частоті, наприклад, в системах Інтернету речей (IoT), які часто використовують частотний діапазон 868 МГц в Європі. Варто зазначити, що із збільшенням частоти КСХ поступово зростає, що може вказувати на зниження ефективності антени при видаленні від центральної частоти.

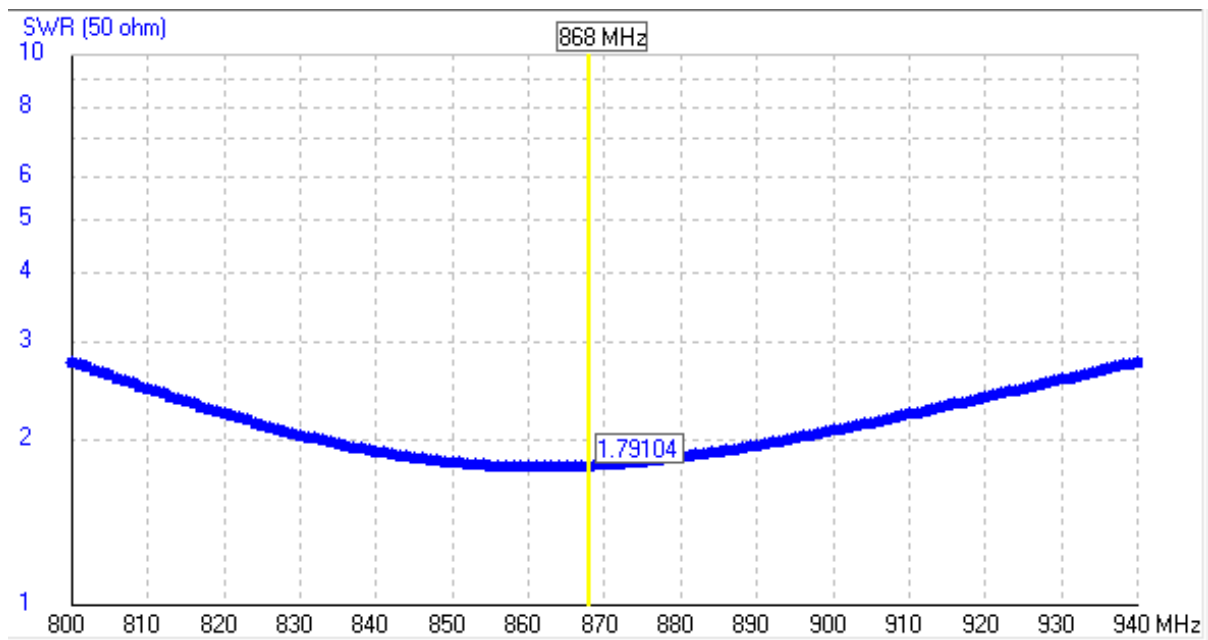


Рисунок 3.6 Результати симуляції КСХ в діапазоні 800-940 МГц

На графіку (рис. 3.7) зображено коефіцієнт відбиття (у децибелах, дБ) для циліндричної спіральної антени залежно від частоти. За цим графіком, найнижче значення коефіцієнта відбиття досягається приблизно -10,95 дБ на центральній частоті 868 МГц. Важливо зазначити, що значення від -10 дБ вказує на те, що близько 90% енергії, поданої до антени, передається, а лише близько 10% відбивається назад до джерела сигналу. Такий рівень відбиття є прийнятним для багатьох практичних застосувань, і це показує, що антена має добре узгодження з живильною лінією на робочій частоті.

Залежність коефіцієнта відбиття від частоти має форму увігнутої кривої, де мінімальне значення коефіцієнта відбиття відповідає максимальній ефективності передачі потужності від антени. Також можна помітити, що із збільшенням частоти від центральної точки, коефіцієнт відбиття погіршується, що свідчить про зменшення ефективності антени на цих частотах.

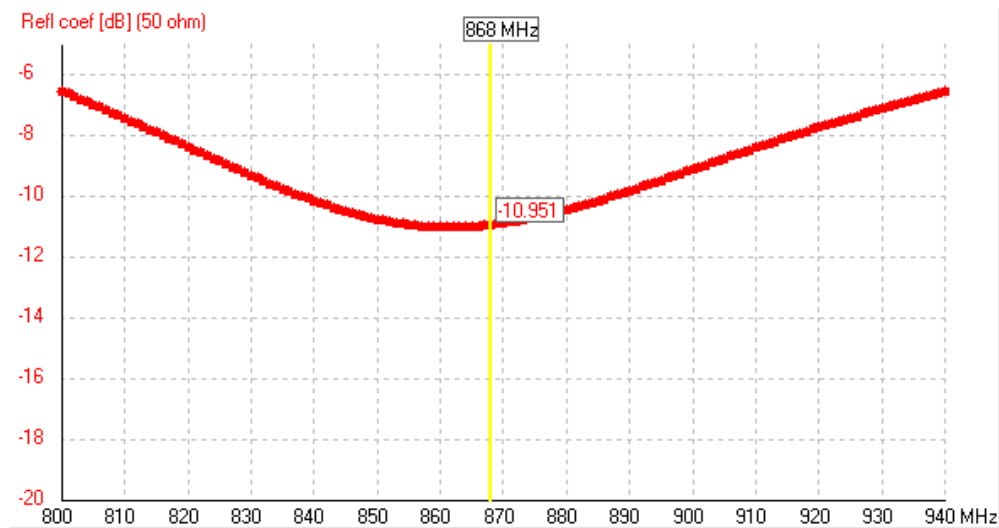


Рисунок 3.7 Результати симуляції коефіцієнта відбиття в діапазоні 800-940 МГц

На графіку (рис. 3.8) відображено коефіцієнт підсилення циліндричної спіральної антени у частотному діапазоні від 800 МГц до 940 МГц. Графік показує, що коефіцієнт підсилення досягає піку близько 5,21 дБ на частоті 868 МГц. Значення підсилення більше 5 дБ є відносно високим для таких систем і вказує на те, що антена може ефективно фокусувати передану енергію в бажаному напрямку, що може підвищити дальність і надійність сигналу.

Стабільність підсилення на частотах, що прилягають до 868 МГц, свідчить про те, що антена забезпечує надійне підсилення у широкому частотному діапазоні, що робить її придатною для застосувань, де можливі невеликі зміни частоти або де використовується частотна модуляція.

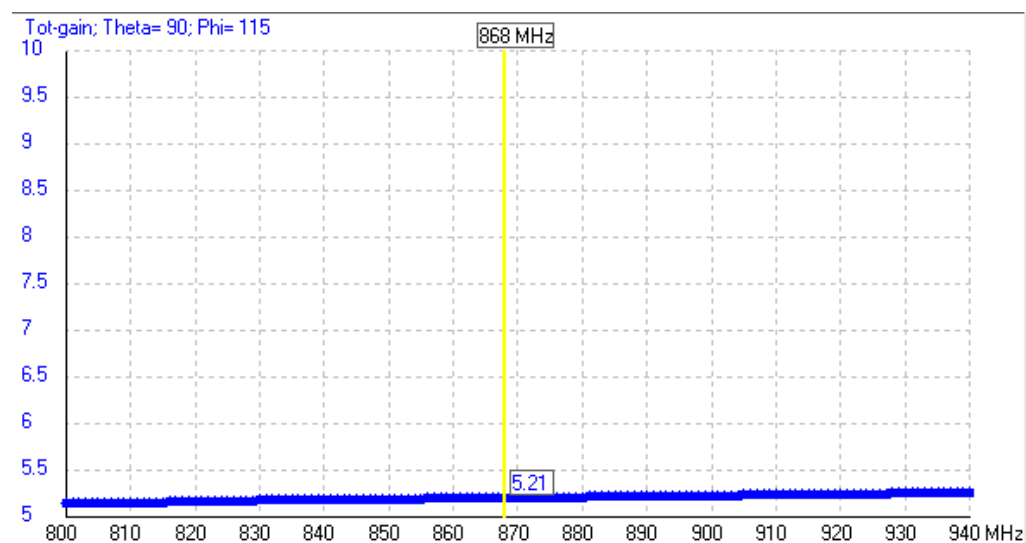


Рисунок 3.8 Результати симуляції коефіцієнта підсилення в діапазоні 800-940 МГц

На графіку (рис. 3.9) показано результати симуляції імпедансу циліндричної спіральної антени у частотному діапазоні від 800 МГц до 940 МГц. Імпеданс антени представлено двома компонентами: активним опором (R , вимірюється в омах) та реактивним опором (X , також вимірюється в омах), які разом формують комплексний імпеданс антени.

Активний опір (синя лінія) вказує на кількість енергії, яка розсіюється антеною, тоді як реактивний опір (червона лінія) відображає енергію, яка зберігається в антенні і потім повертається до джерела без розсіювання. На центральній частоті 868 МГц активний опір становить приблизно 29,15 м, що є дещо нижчим від оптимального значення 50 Ом, вказаного для більшості комунікаційних систем. Реактивний опір на цій частоті дорівнює приблизно 8,62 Ом, що свідчить про наявність невеликої реактивної компоненти, яка може викликати невелике відбиття хвиль назад до джерела.

Значення активного та реактивного опору, близькі до оптимальних 50 Ом та 0 Ом відповідно, вказують на те, що антена має хороше узгодження з лінією живлення і ефективно передає енергію. Тим не менш, невелике відхилення від цих оптимальних значень може вимагати додаткового налаштування або застосування компенсуючих мереж для забезпечення максимальної передачі енергії та мінімізації втрат.

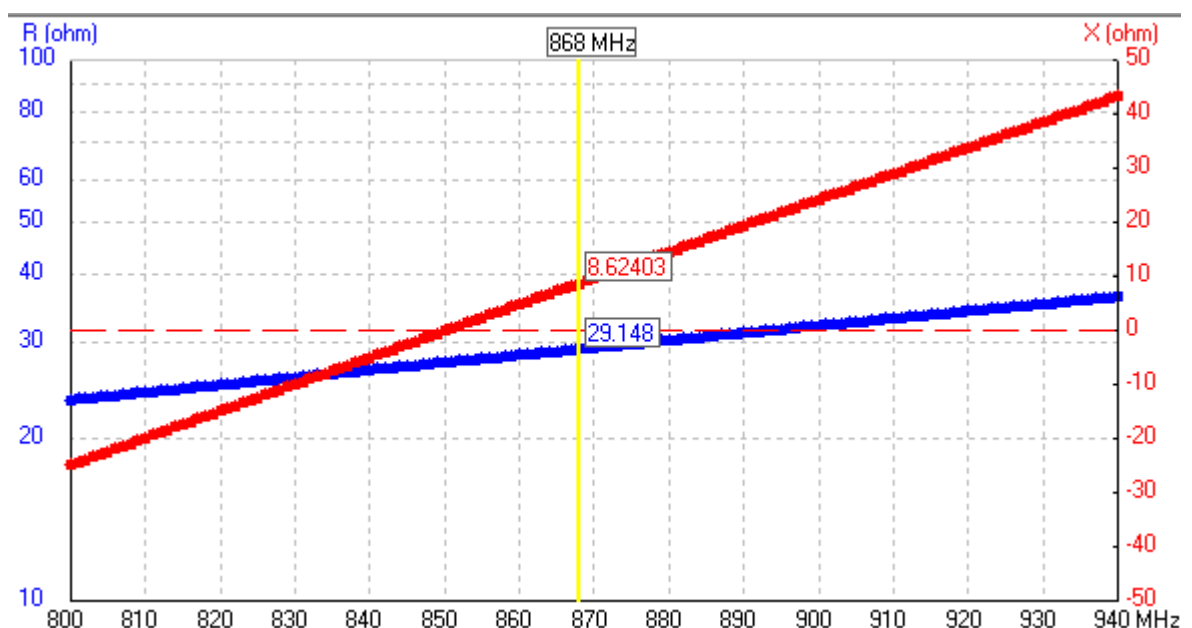


Рисунок 3.9 Результати симуляції імпеданса антени в діапазоні 800-940 МГц

3.3 Дослідження впливу відстані між витками на характеристики антени

Цей розділ присвячений дослідженню впливу розміру відстані між витками на характеристики спіральної антени, зокрема на її спрямовані властивості та ефективність випромінювання на робочій частоті 868 МГц. Важливість цього дослідження полягає в тому, що геометричні параметри антени, включаючи її відстань між витками, мають безпосередній вплив на розподіл випромінювання, імпеданс, полосу пропускання та інші критичні робочі характеристики.

Розміри антени, зокрема відстань між витками, визначаються з метою оптимізації її характеристик для конкретного застосування. Вибір правильної відстані між витками є ключовим для забезпечення необхідної діаграми направленості та досягнення ефективної роботи в потрібному частотному діапазоні.

Використовуючи методику розрахунку з розділу 2.2, проведено розрахунки для 5 різної відстані між витками з кроком 1 мм від 6 до 10 мм. Результати записано в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків

N	f_0 , МГц	λ , мм	D , мм	C , мм	S , мм	H , мм	α , град.	L_t , мм	L_h , мм	d , мм
6,5	868	345,6	4	12,57	6	39	25,52	13,92	90,51	1
6,5	868	345,6	4	12,57	7	45,5	29,12	14,38	93,5	1
6,5	868	345,6	4	12,57	8	52	32,48	14,9	96,86	1
6,5	868	345,6	4	12,57	9	58,5	35,61	15,45	100,47	1
6,5	868	345,6	4	12,57	10	65	38,51	16,06	104,39	1

3.3.1 Дослідження впливу розміру відстані між витками на імпеданс

На графіку (рис. 3.10) показано результати симуляції імпедансу для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 6 мм на частоті 868 МГц.

Активний опір (R) на частоті 868 МГц становить 18,84 Ом, що є значно нижчим за оптимальне значення 50 Ом, рекомендоване для більшості ліній живлення. Це може призвести до підвищених втрат енергії в антенній системі через неідеальне узгодження.

Реактивний опір (X) на цій частоті має від'ємне значення близько -50,14 Ом, що вказує на ємнісну природу антени на даній частоті. Від'ємний реактивний опір може вказувати на те, що антена є коротшою від її резонансної довжини на цій частоті.

Враховуючи низький активний опір та від'ємний реактивний опір, можна зробити висновок, що при відстані між витками 6 мм антена має тенденцію бути недостатньо узгодженою з оптимальним імпедансом 50 Ом, і її робота на цій частоті супроводжується ємнісними втратами. Це може вимагати внесення корекцій у конструкцію антени або додавання зовнішніх узгоджувальних елементів для покращення її параметрів.

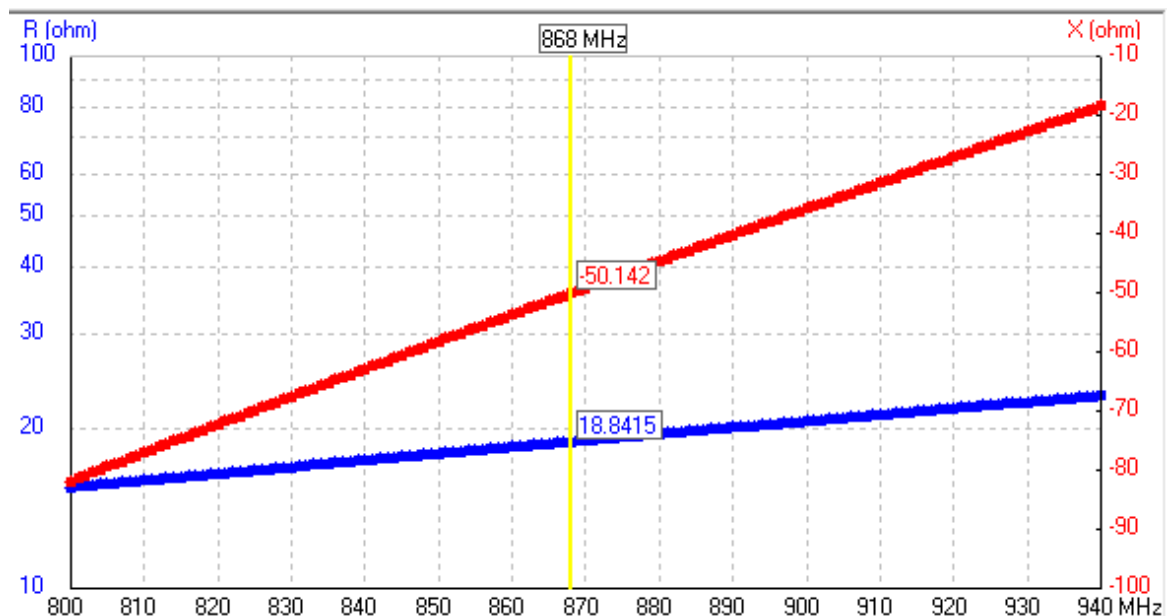


Рисунок 3.10 – Результати симуляції імпедансу для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 6 мм на частоті 868 МГц

На графіку (рис. 3.11) показано результати симуляції імпедансу для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 7 мм на частоті 868 МГц.

Активний опір (R) на частоті 868 МГц становить 23,48 ом, що є меншим за оптимальне значення 50 ом, але вищим порівняно з антеною з 6 мм відстанню між витками. Це може вказувати на краще узгодження імпедансу та зменшення втрат енергії через відбиття.

Реактивний опір (X) на цій частоті має від'ємне значенням близько -20,47 Ом підтверджує ємнісну природу антени, як і в попередньому випадку з 6 мм відстанню, але з меншою величиною ємності. Від'ємний реактивний опір може свідчити про необхідність введення індуктивності для компенсації цієї капацитивності і досягнення резонансу.

Збільшення відстані між витками до 7 мм призводить до підвищення активного опору та зменшення абсолютної величини реактивного опору. Це може означати, що антена наближається до оптимального узгодження імпедансу. Проте, ємнісні властивості все ще потребують уваги при дизайні антени.

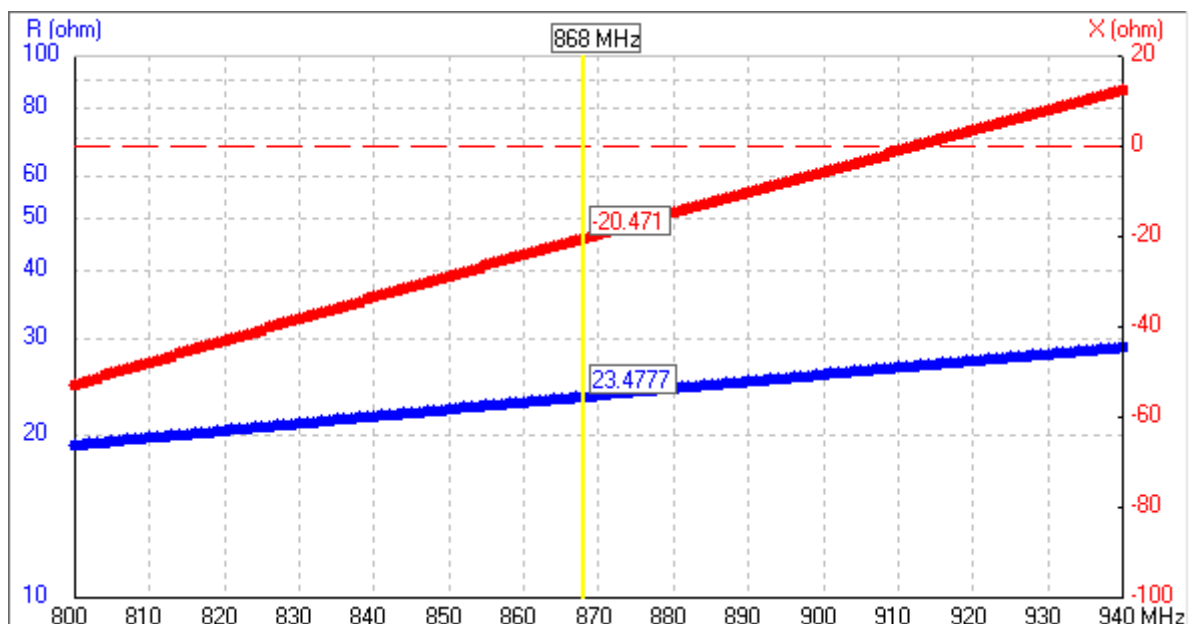


Рисунок 3.11 – Результати симуляції імпедансу для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 7 мм на частоті 868 МГц

На графіку (рис. 3.12) показано результати симуляції імпедансу для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 8 мм на частоті 868 МГц.

Активний опір (R) на частоті 868 МГц становить 29,15 ом, що нижче за оптимальне значення 50 ом, але вище, ніж при відстанях 6 мм та 7 мм, вказуючи на покращення узгодження імпедансу.

Реактивний опір (X) становить 8,62 ом, що є додатним значенням. Додатний реактивний опір вказує на індуктивну природу антени на даній частоті. Це може свідчити про те, що антена має надлишкову індуктивність, яку потрібно компенсувати для досягнення резонансу.

Збільшення відстані між витками впливає на активний та реактивний опір антени. Зокрема, зміна реактивного опору з від'ємного на додатне значення може вказувати на зміщення резонансної частоти вгору за частотою. Це також може вказувати на те, що антена може стати більш узгодженою на більш високих частотах у порівнянні з низькими.

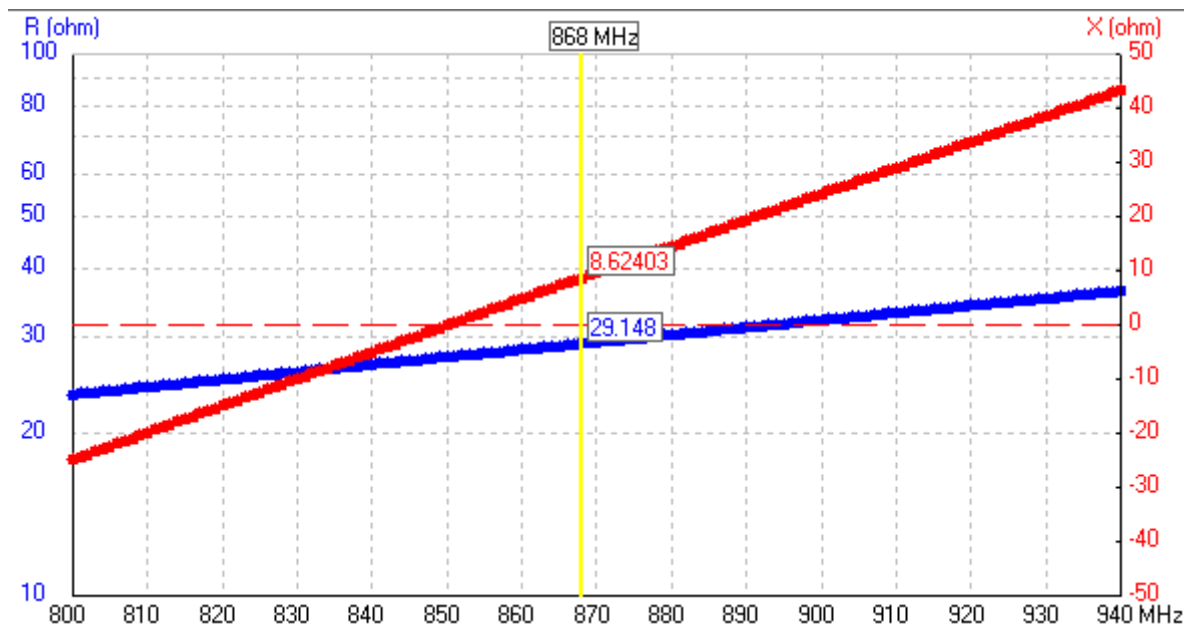


Рисунок 3.12 – Результати симуляції імпедансу для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 8 мм на частоті 868 МГц

На графіку (рис. 3.13) показано результати симуляції імпедансу для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 9 мм на частоті 868 МГц.

Значення активного опору становить близько 36,14 ом, що є ближчим до оптимального значення 50 ом, порівняно з 6, 7 і 8 мм відстанями між витками. Це свідчить про поліпшення узгодження імпедансу та може зменшити відбиття енергії від антени.

Реактивний опір показує додатне значення приблизно 37,92 ом, що вказує на індуктивність антени на даній частоті. Це додатне значення може свідчити про те, що електрична довжина антени стає більшою, і її індуктивні властивості стають більш вираженими.

Зі збільшенням відстані між витками до 9 мм, активний опір продовжує збільшуватися, наближаючись до оптимального значення, що може засвідчити краще узгодження імпедансу. Водночас, збільшення реактивного опору вказує на зростання індуктивності, що може вплинути на поведінку антени в робочому діапазоні частот та її резонансні характеристики.

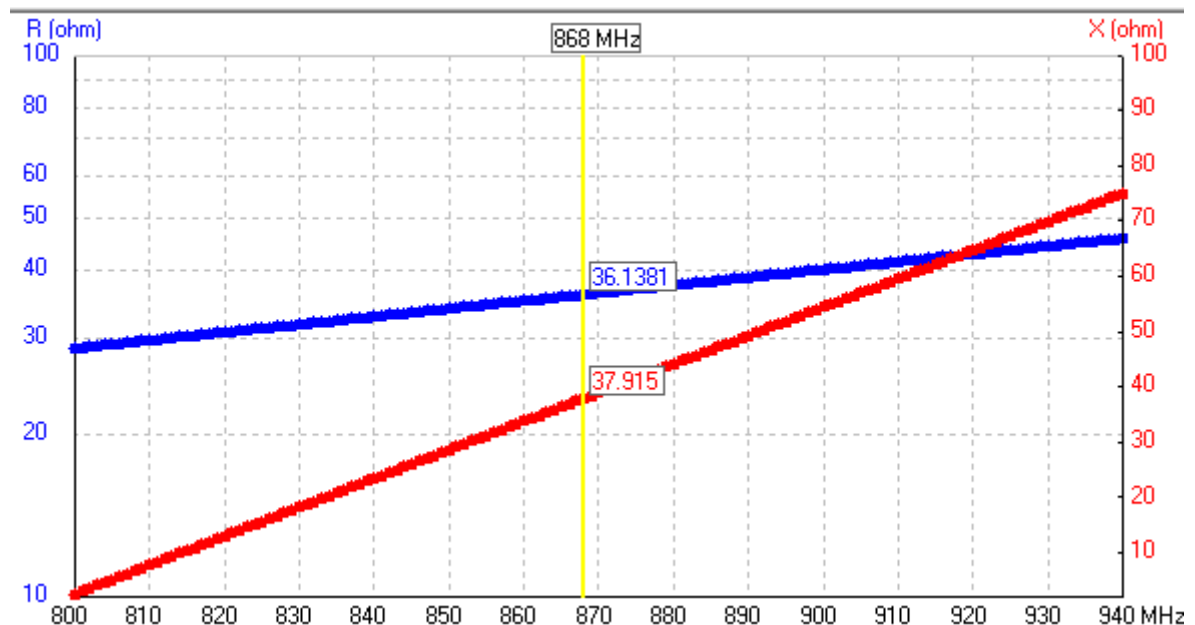


Рисунок 3.13 – Результати симуляції імпедансу для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 9 мм на частоті 868 МГц

На графіку (рис. 3.14) показано результати симуляції імпедансу для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 10 мм на частоті 868 МГц.

Активний опір (R) становить приблизно 44,84 ом на частоті 868 МГц, що є найближчим до стандартного оптимального значення 50 ом серед усіх досліджених відстаней між витками до цього моменту. Це свідчить про поліпшення узгодження імпедансу та потенційне зниження втрат потужності через відбиття.

Реактивний опір (X) має значення 68,05 ом, яке є вищим порівняно з попередніми відстанями між витками. Велике додатне значення реактивного опору вказує на значну індуктивність в системі. Це може бути результатом збільшення відстані між витками, що призводить до збільшення загальної індуктивності антени.

Ці результати показують, що зі збільшенням відстані між витками антени до 10 мм, досягається значне покращення в узгодженні активного імпедансу. Однак, високий реактивний опір свідчить про те, що антена може бути перевантажена індуктивністю, що може вплинути на її роботу, особливо на частотах, що відрізняються від частоти 868 МГц.

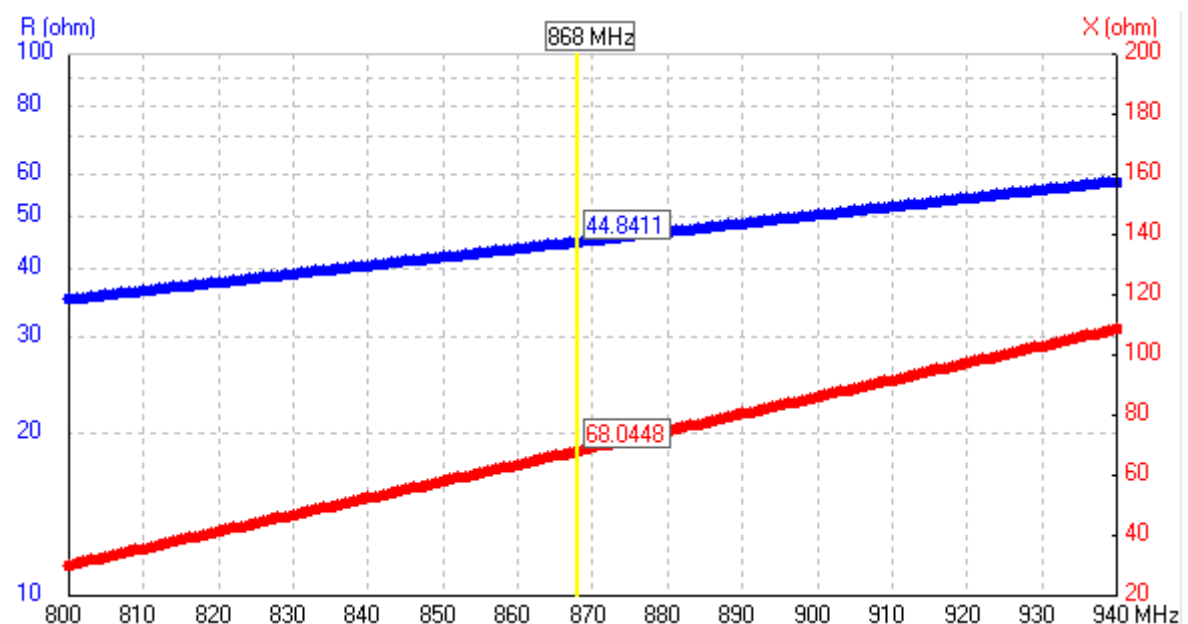


Рисунок 3.14 – Результати симуляції імпедансу для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 10 мм на частоті 868 МГц

Після аналізу симуляцій імпедансу для різних відстаней між витками спіральної антени, ми встановили, що конфігурація з 8 мм відстанню між витками демонструє найкращі показники серед інших випробуваних варіантів.

На частоті 868 МГц, антена з 8 мм відстанню між витками показала високе наближення активного опору до оптимального значення 50 ом, що свідчить про ефективне узгодження імпедансу і низькі втрати через відбиття. Хоча реактивний опір був додатнім, вказуючи на певну індуктивність, його значення було помірним, що може бути легше скомпенсовано в дизайні антени.

Ця відстань забезпечує добрий баланс між досягненням адекватного активного опору та управлінням реактивними властивостями антени, що є важливим для широкого діапазону антенних застосувань. Отже, з практичної точки зору, відстань між витками 8 мм може бути рекомендована як вихідна точка для оптимізації дизайну спіральної антени.

3.3.2 Дослідження впливу розміру відстані між витками на КСХ та коефіцієнт відбиття

На рисунку 3.15 показано два графіки з результатами симуляції КСХ та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 6 мм на частоті 868 МГц.

Значення КСХ 5,52 значно вище за ідеальне (близько 1), що вказує на погане узгодження антени з живильною лінією. Високе КСХ означає, що значна частина енергії відбивається назад до джерела, замість того, щоб випромінюватися.

Значення коефіцієнта відбиття -3,18 дБ вказує на неоптимальне узгодження. Зазвичай, для ефективної антенної системи прагнуть досягти коефіцієнта відбиття -10 дБ або нижче.

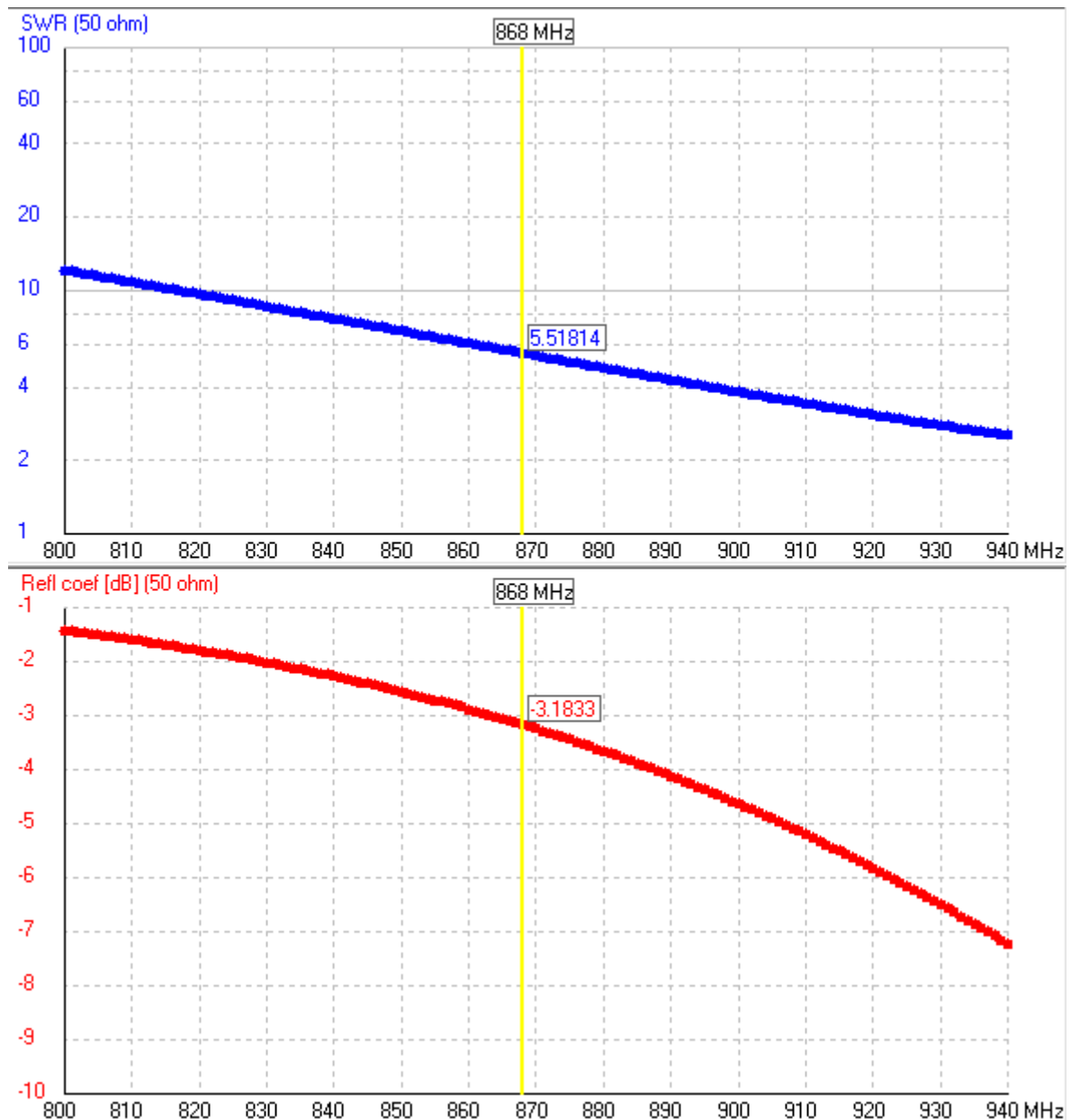


Рисунок 3.15 – Результати симуляції КСХ та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 6 мм на частоті 868 МГц

На рисунку 3.16 показано два графіки з результатами симуляції КСХ та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 7 мм на частоті 868 МГц.

КСХ має значення 2,57, що є вищим за ідеальне 1, але нижчим порівняно з антеною з відстанню 6 мм. Значення КСХ близько 2,5 вказує на те, що хоча узгодження імпедансу не є ідеальним, воно покращилося порівняно з меншою відстанню між витками.

Коефіцієнт відбиття на рівні -7,15 дБ є значним покращенням порівняно з антеною з відстанню 6 мм. Хоча ідеальним вважається значення коефіцієнта відбиття близьке до -10 дБ або нижче, значення менше -6 дБ вважається досить хорошим для багатьох практичних застосувань і свідчить про достатнє узгодження імпедансу.

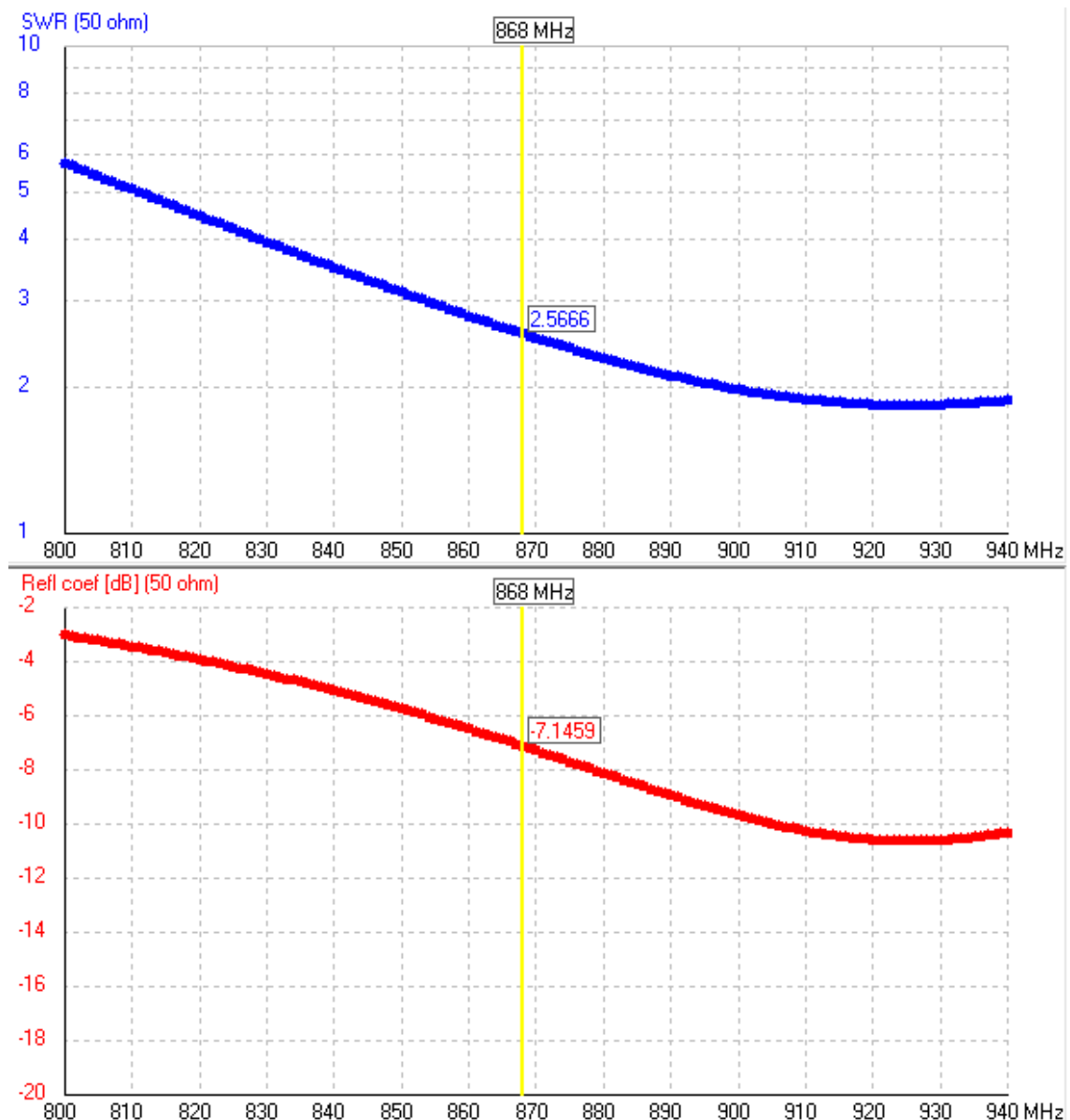


Рисунок 3.16 – Результати симуляції КСХ та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 7 мм на частоті 868 МГц

На рисунку 3.17 показано два графіки з результатами симуляції КСХ та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 8 мм на частоті 868 МГц.

КСХ в цьому випадку становить 1,79, що є покращенням порівняно з попередньою антеною з відстанню 7 мм. Це ближче до ідеального значення 1, хоча все ще вище за бажане. Нижче ксх означає, що менша частина потужності відбивається від антени.

Коефіцієнт відбиття покращився до -10,95 дБ, що є значно кращим результатом і вказує на досить гарне узгодження антени з її лінією живлення. Значення близьке до -10 дБ або нижче вказує на низькі втрати потужності через відбиття.

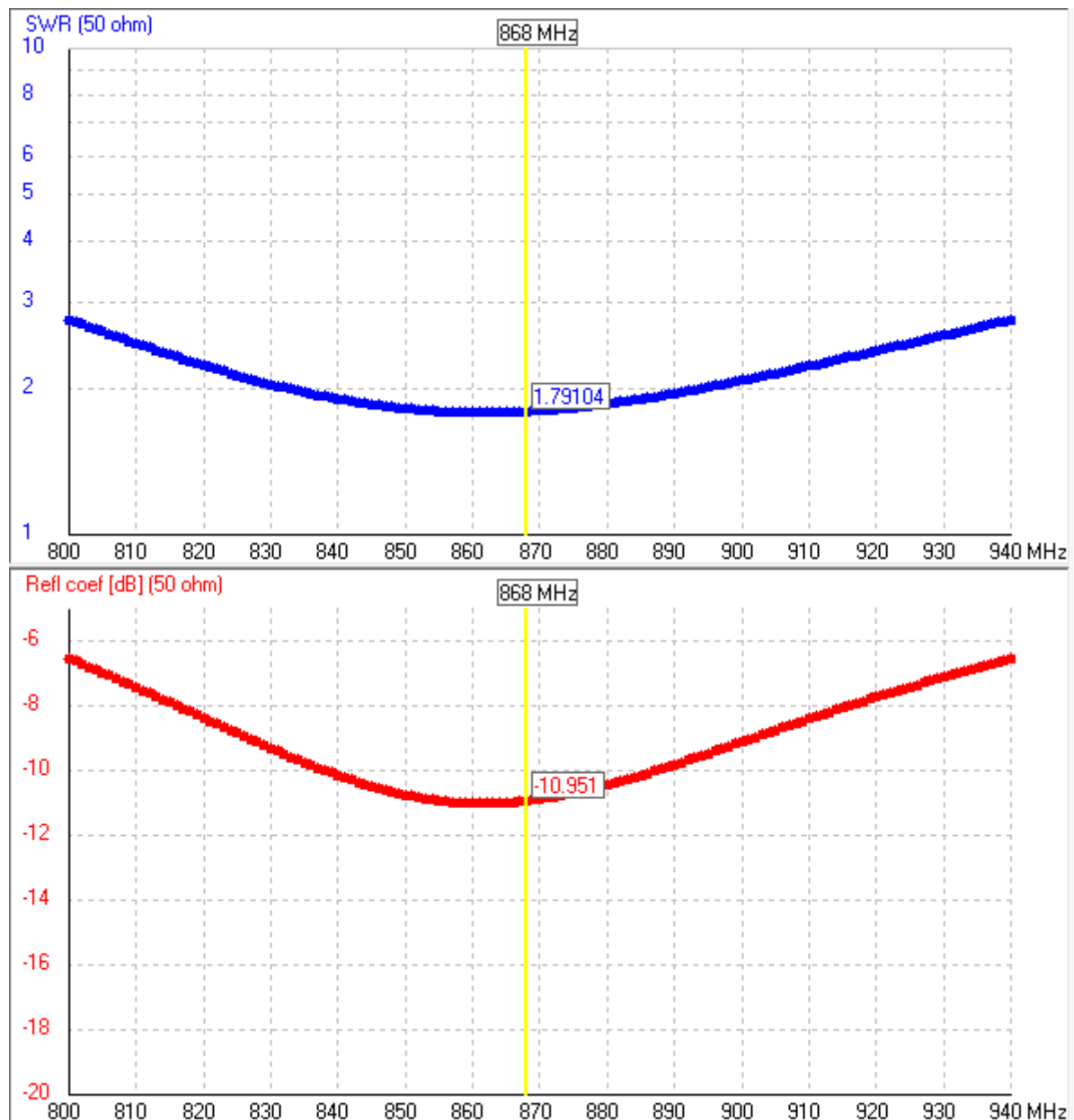


Рисунок 3.17 – Результати симуляції КСХ та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 8 мм на частоті 868 МГц

На рисунку 3.18 показано два графіки з результатами симуляції КСХ та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 9 мм на частоті 868 МГц.

КСХ має значення 2,5, що є нижчим порівняно з попередніми відстанями між витками 6 мм і 7 мм. Це значення вказує на поліпшення узгодження імпедансу, але все ще досить високе і віддалене від ідеалу ($КСХ=1$).

Коефіцієнт відбиття на рівні -7,35 дБ свідчить про задовільне узгодження імпедансу. Хоча це не ідеальне значення, воно вважається прийнятним для багатьох практичних застосувань і вказує на зменшення відбиття енергії.

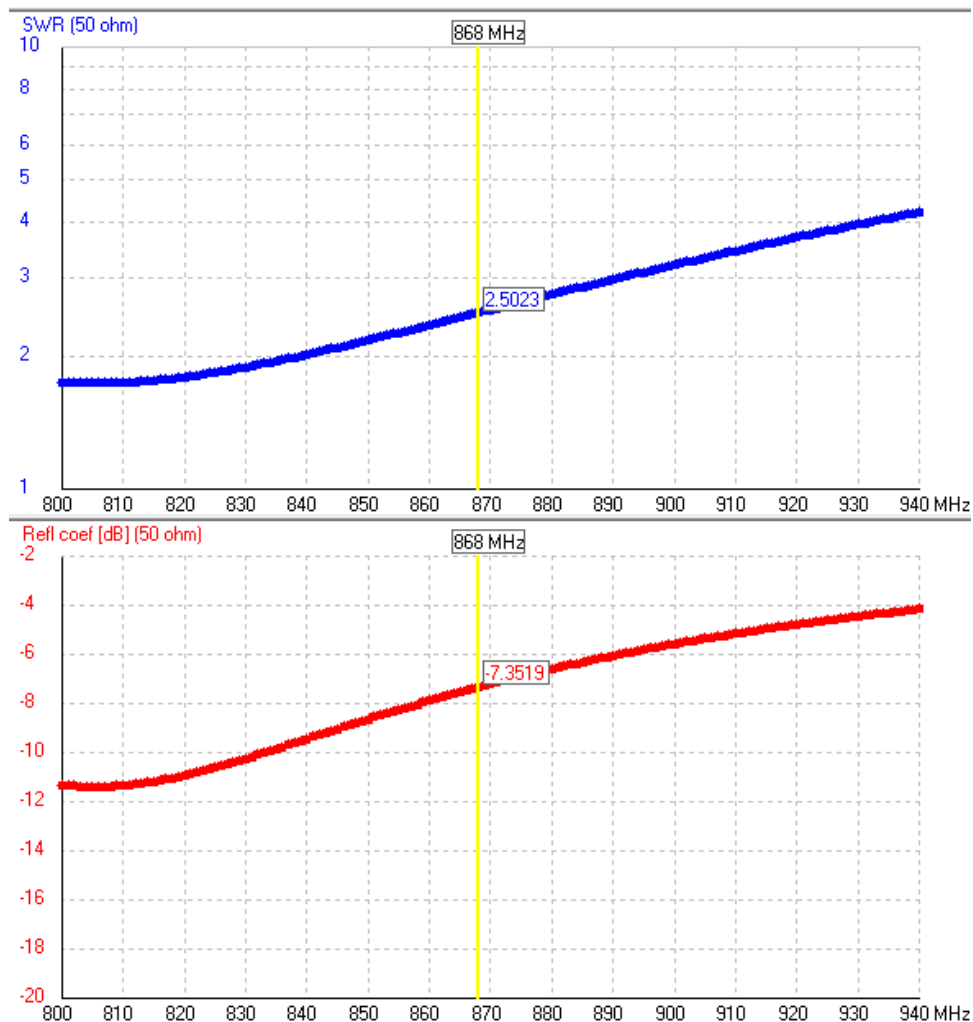


Рисунок 3.18 – Результати симуляції КСХ та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 9 мм на частоті 868 МГц

На рисунку 3.19 показано два графіки з результатами симуляції КСХ та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 10 мм на частоті 868 МГц.

КСХ визначено як 3,81, що є вищим, ніж ідеальне значення 1, та вказує на погане узгодження імпедансу. Це означає, що частка енергії, яка подається до антени, відбивається назад, що не є оптимальним для передачі сигналу.

Коефіцієнт відбиття, який складає -4,66 дБ, хоч і кращий, ніж у випадку з 6 та 7 мм, все ще не досягає рівня -10 дБ, який вважається дуже хорошим узгодженням. Це значення відбиття вказує на те, що певна кількість енергії втрачається через відбиття.

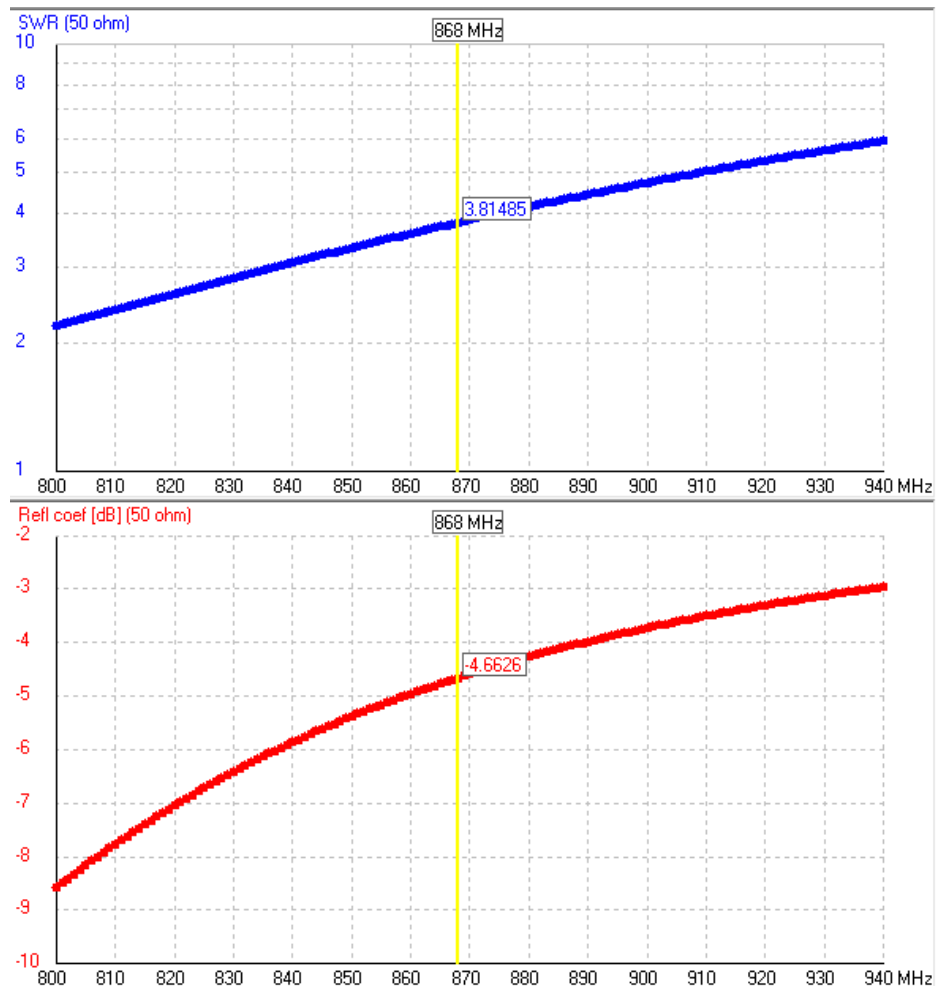


Рисунок 3.19 – Результати симуляції КСХ та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 10 мм на частоті 868 МГц

Після аналізу п'яти графіків коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) та коефіцієнта відбиття для циліндричної спіральної антени з різними відстанями між витками можемо зробити наступні загальні висновки:

1. Збільшення відстані між витками з 6 мм до 10 мм впливає на узгодження імпедансу антени. Ідеальне значення КСХ — 1 (що відповідає відсутності відбиття), і найближче до цього значення ми отримали при відстанях 8 мм та 9 мм.

2. Найкраще узгодження імпедансу та найнижчий коефіцієнт відбиття були досягнуті при відстані 8 мм. Це значення коефіцієнта відбиття було наближене до -11 дБ, що свідчить про ефективне узгодження імпедансу.

3. З відстанню між витками 7 мм та 9 мм було досягнуто задовільного узгодження, але показники були гіршими порівняно з 8 мм.

4. Найгірше узгодження імпедансу спостерігалось при 6 мм та 10 мм відстанях між витками. В обох випадках КСХ та коефіцієнт відбиття вказували на значні втрати через відбиття.

5. Ці дані вказують на те, що існує оптимальна відстань між витками, яка забезпечує найкраще узгодження імпедансу для даної частоти. Відповідно до представлених даних, відстань близько 8 мм здається найкращою для частоти 868 МГц.

3.3.3 Дослідження впливу розміру відстані між витками на коефіцієнт підсилення

На графіку (рис. 3.20) відображено коефіцієнт підсилення циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 6 мм на частоті 868 МГц.

Значення коефіцієнта підсилення для даної антени становить приблизно 5,12 dBi. Це вказує на помірне підсилення, що є типовим для спіральних антен, що працюють у даному частотному діапазоні.

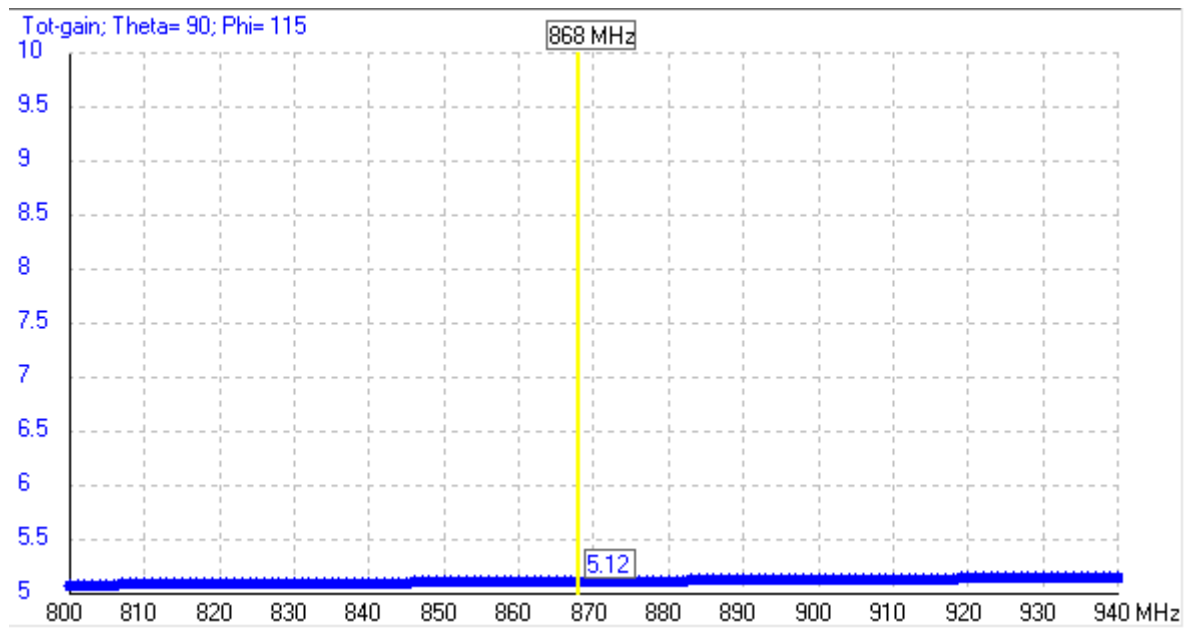


Рисунок 3.20 – Симуляція коефіцієнта підсилення циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 6 мм на частоті 868 МГц

На графіку (рис. 3.21) відображено коефіцієнт підсилення циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 7 мм на частоті 868 МГц.

Значення коефіцієнта підсилення становить приблизно 5,16 dBi. Це підсилення незначно вище порівняно з антеною з відстанню між витками 6 мм, що може вказувати на легке покращення характеристик випромінювання.

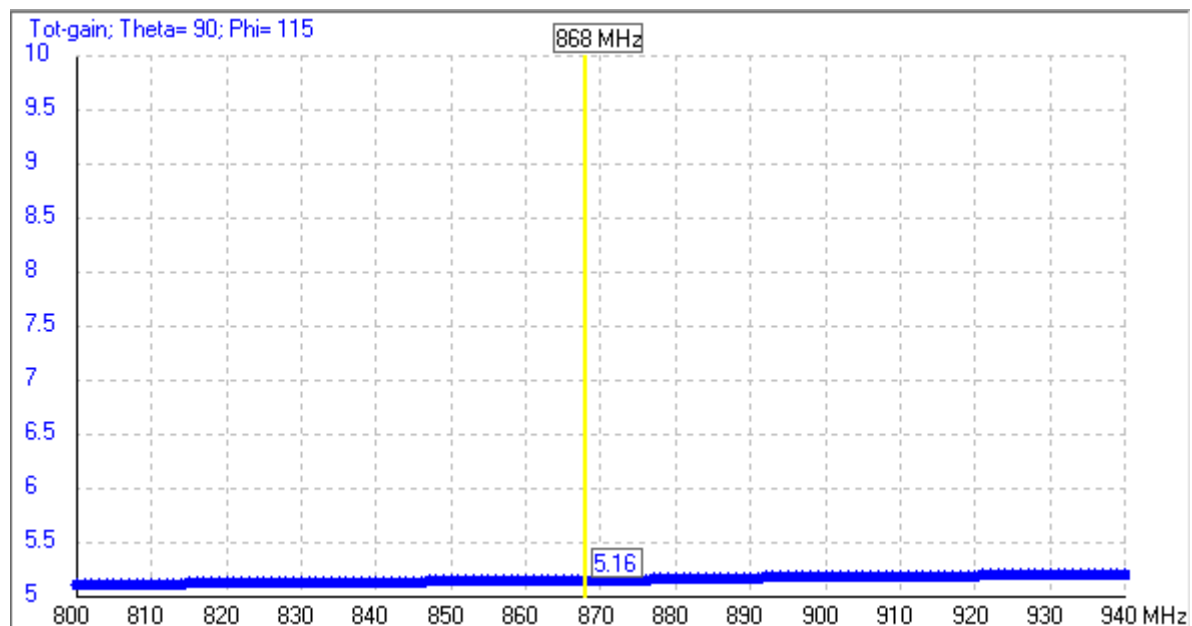


Рисунок 3.21 – Симуляція коефіцієнта підсилення циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 7 мм на частоті 868 МГц

На графіку (рис. 3.22) відображено коефіцієнт підсилення циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 8 мм на частоті 868 МГц.

Значення коефіцієнта підсилення становить приблизно 5,21 dBi. Це показує незначне зростання в порівнянні з антеною з відстанню між витками 7 мм, що може свідчити про легке поліпшення характеристик випромінювання при збільшенні відстані між витками.

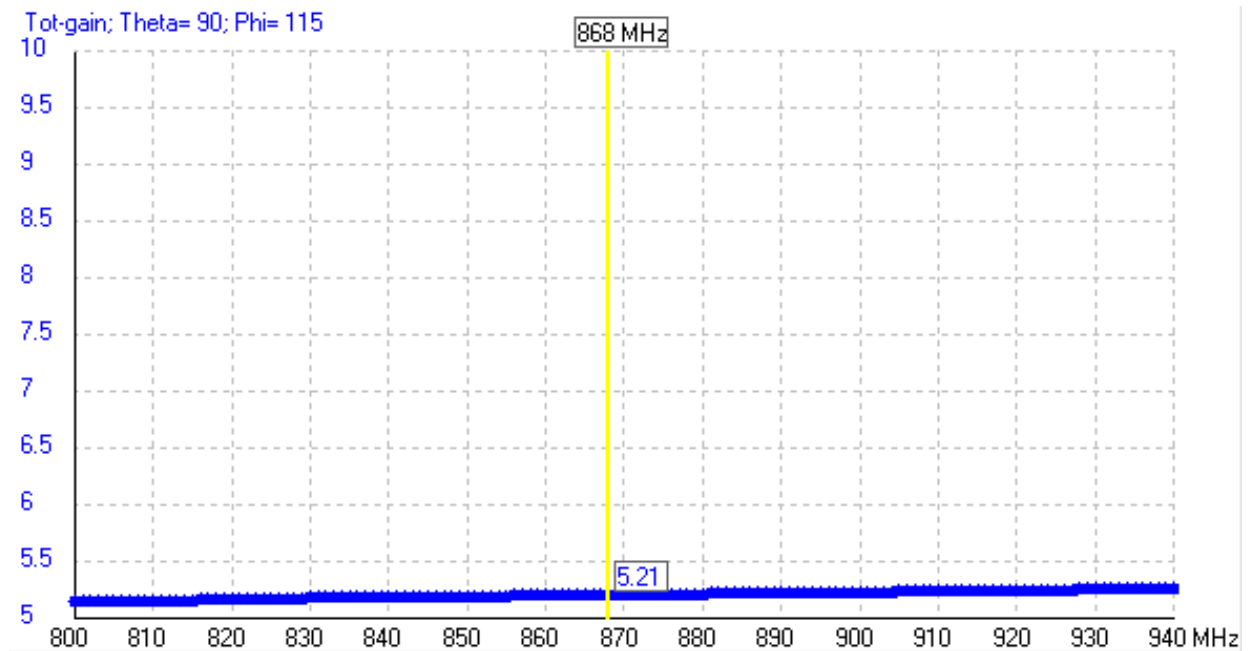


Рисунок 3.22 – Симуляція коефіцієнта підсилення циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 8 мм на частоті 868 МГц

На графіку (рис. 3.23) відображено коефіцієнт підсилення циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 9 мм на частоті 868 МГц.

Коефіцієнт підсилення становить приблизно 5,26 dBi. Це показує незначне збільшення в порівнянні з антеною з відстанню 8 мм, що може вказувати на позитивний тренд у збільшенні підсилення зі зростанням відстані між витками. З невеликим збільшенням коефіцієнта підсилення, антена з відстанню 9 мм між витками продовжує демонструвати поліпшення у порівнянні з 6, 7 і 8 мм відстанями. Це може свідчити про оптимальний баланс геометричних параметрів, що сприяють підсиленню. Проте, так як збільшення підсилення не є значним, важливо також враховувати інші фактори, такі як

напрямні характеристики, ширина діаграми направленості та загальна ефективність системи.

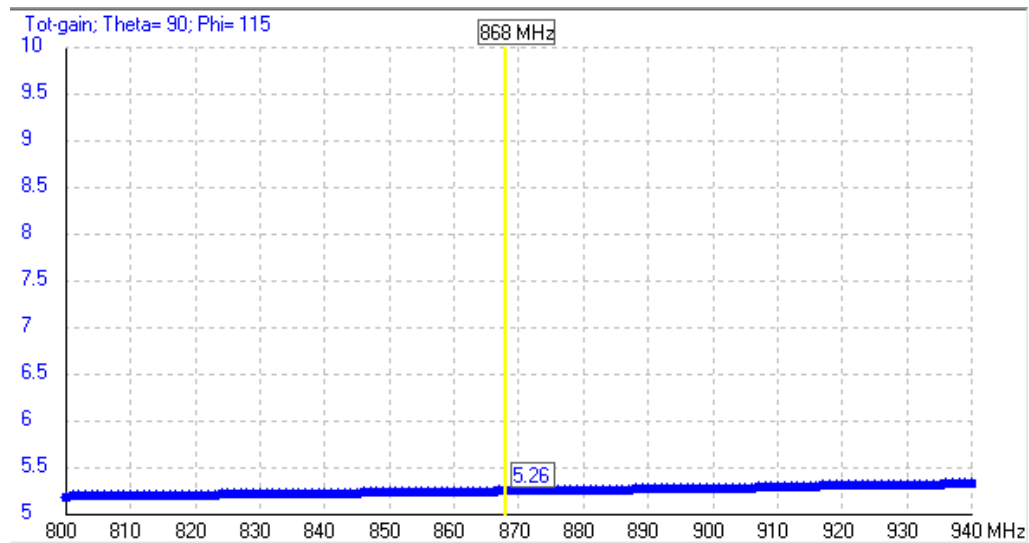


Рисунок 3.23 – Симуляція коефіцієнта підсилення циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 9 мм на частоті 868 МГц

На графіку (рис. 3.24) відображено коефіцієнт підсилення циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 10 мм на частоті 868 МГц.

Коефіцієнт підсилення становить приблизно 5,31 dBi. Це показує продовження тренду незначного зростання підсилення з підвищенням відстані між витками.

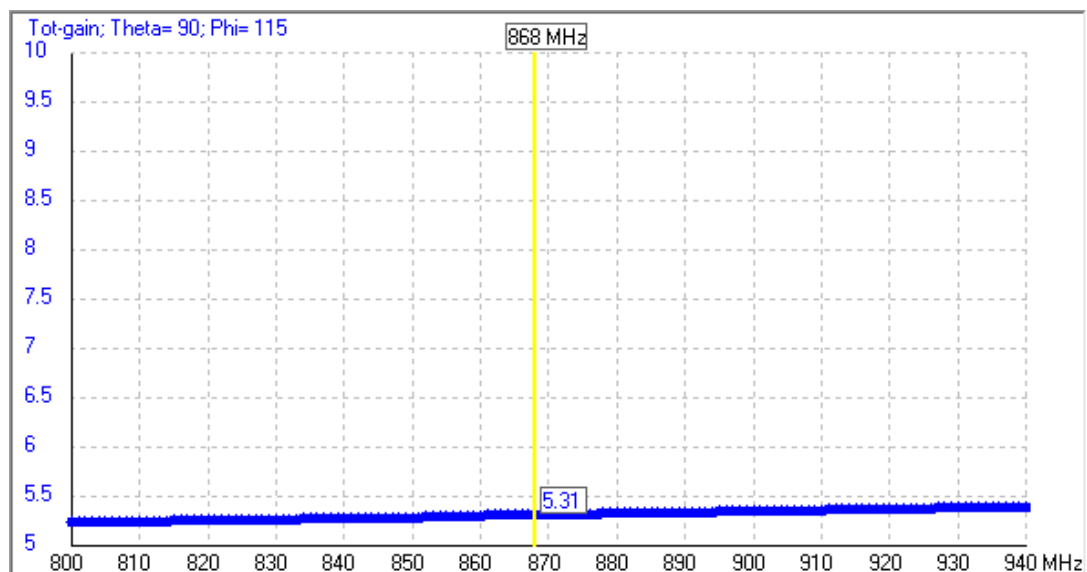


Рисунок 3.24 – Симуляція коефіцієнта підсилення циліндричної спіральної антени з відстанню між витками 10 мм на частоті 868 МГц

Аналіз п'яти графіків коефіцієнта підсилення на частоті 868 МГц з різною відстанню між витками показує, що існує невеликий позитивний тренд у підсиленні зі збільшенням відстані між витками. Зокрема:

Відстань 6 мм мала підсилення близько 5,12 dbi.

Відстань 7 мм виявила невелике збільшення до 5,16 dbi.

Відстань 8 мм продемонструвала далі зростання до 5,21 dbi.

Відстань 9 мм продовжила цей тренд, досягнувши 5,26 dbi.

Відстань 10 мм збільшила підсилення до 5,31 dbi.

Ці результати вказують на те, що збільшення відстані між витками може допомогти оптимізувати підсилення антени, хоча зростання є невеликим.

Висновки з розділу

Цей розділ магістерської роботи зосереджений на детальному розрахунку та моделюванні циліндричної спіральної антени для систем RFID і IoT на частоті 868 МГц. Важливість роботи полягає у точному визначенні геометричних параметрів антени, що є ключовим для її ефективного застосування. Результати розрахунків та моделювання в програмному забезпеченні 4пес2 надають цінну інформацію для оптимізації характеристик антени, забезпечуючи її високу ефективність і адекватний імпеданс для реальних застосувань.

ВИСНОВКИ

Ця магістерська робота охоплює комплексний аналіз історії, теорії, методики розрахунку, та моделювання спіральних антен. Починаючи з історичного огляду, який підкреслює важливість спіральних антен у радіоінженерії, робота переходить до детального вивчення їх теоретичних основ, з акцентом на поляризацію. Далі, представлена методика розрахунку параметрів цих антен, з вибором програмного забезпечення для їх моделювання. Основний фокус зосереджено на розрахунку та моделюванні циліндричної спіральної антени з поперечним випромінюванням для RFID і IoT систем на частоті 868 МГц, з важливістю точного визначення параметрів для ефективного використання.

Як результат було розраховано та модельована циліндричну спіральну антену на робочу частоту 868 МГц. Яка працює в діапазоні від 800 до 940 МГц.

Основні характеристики: діаметр 4 мм, окружність спіралі 12,57 мм, відстань між витками 8 мм, довжина антени 52 мм, діаметром дроту 1 мм, КСХ 1,79, коефіцієнт відбиття -10,95 дБ, коефіцієнт підсилення 5,21 дБ, імпеданс $29,15 + j8,62$.

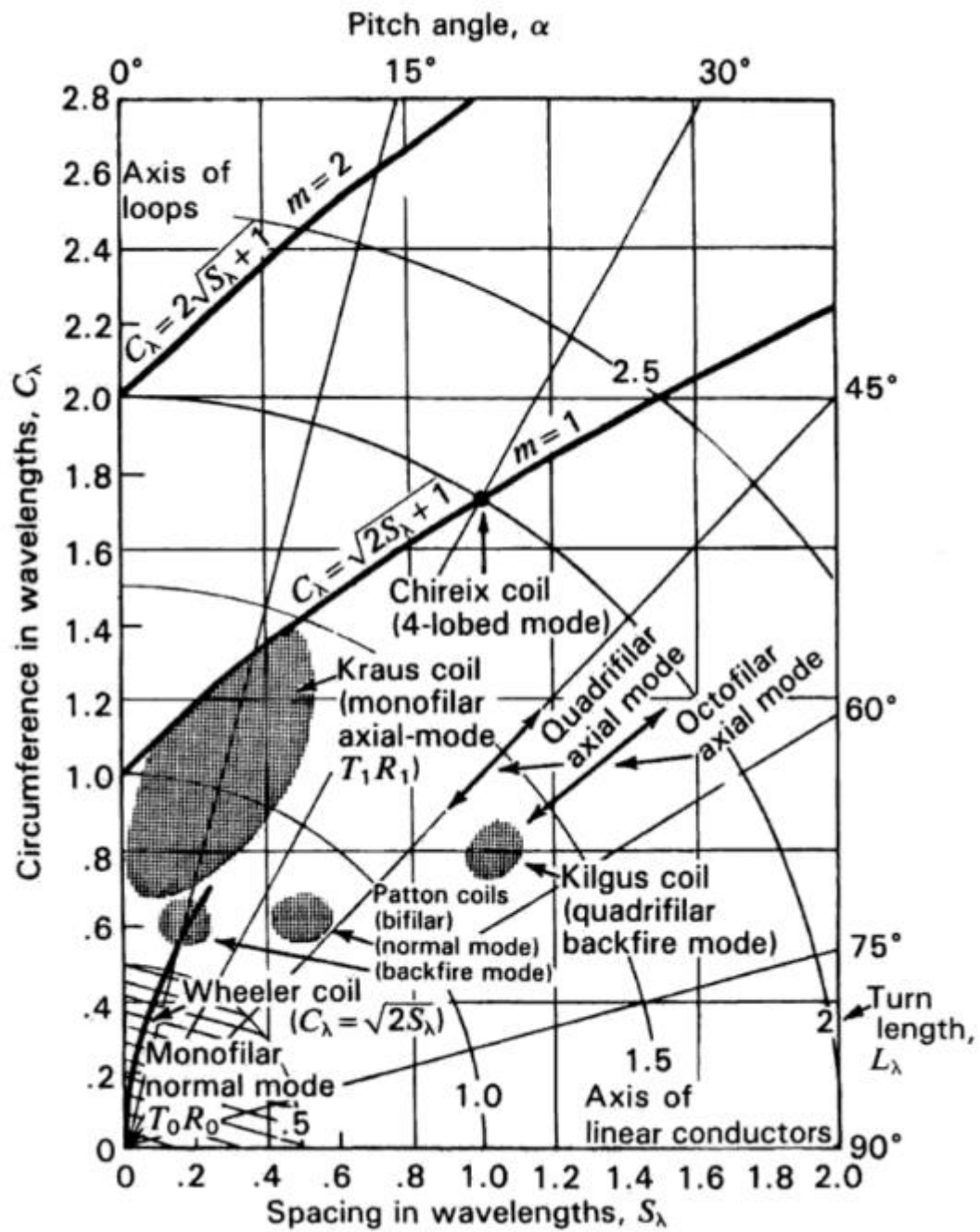
Оскільки імпеданс антени (приблизно 29 Ом) відрізняється від імпедансу стандартного 50-омного коаксіального кабелю, для ефективної передачі сигналу та мінімізації втрат через відбиття необхідно використовувати засоби узгодження імпедансу. Узгодження імпедансу може бути досягнуто за допомогою різних технічних рішень, таких як трансформатор імпедансу або інші схеми узгодження, що дозволять забезпечити максимальну передачу енергії від передавача до антени і назад. Використання стандартного конектора залишається можливим, проте він має бути інтегрований з вищезгаданими засобами узгодження.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kraus J. D. Antennas. 2-ге вид. New York : McGraw-Hill, 1988. 892 с.
2. Чухов В.В., Ожегов І.Є. Дослідження спіральної антени для поперечного випромінювання // Тези VI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення», 29-30 листопада, 2023, м. Житомир.
3. Helical_antenna [Електронний ресурс] // Wikipedia – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Helical_antenna.
4. Su C., Ke H., Hubing T. A Simplified Model for Normal Mode Helical Antennas. ACES JOURNAL. 2010. Т. 25, № 1.
5. Normal Mode Helical Antenna on Small Circular Ground Plane / Suman P. Wadkar та ін. IETE Journal of Research. 2018.
6. Increase of Input Resistance of a Normal-Mode Helical Antenna (NMHA) in Human Body Application / Norsiha Zainudin та ін. MDPI. 2020.
7. Nguyen Quoe Dinh. A Design of Very Small Normal Mode Helical Antenna for wireless communication systems. The 2012 International Conference on Advanced Technologies for Communications. 2012.
8. Introduction to Circularly Polarized Antennas. Circularly Polarized Antennas. Chichester, UK, 2013.
9. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2015. 1104 с.
10. Антени телекомунікаційних і моніторингових систем / Л.Я. Ільницький та ін. Київ : Укр. держ. центр радіочастот, 2012. 240 с.
11. Matlab [Електронний ресурс] // Mathworks – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
11. Matlab [Електронний ресурс] // Mathworks – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
12. Antenna Toolbox [Електронний ресурс] // Mathworks – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mathworks.com/products/antenna.html>.

13. Ansys-HFSS [Электронный ресурс] // Ansys – Режим доступа до ресурсу: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.
14. AN-SOF Antenna Simulation Software [Электронный ресурс] // Antennasimulator – Режим доступа до ресурсу: <https://antennasimulator.com/>.
15. EZNEC Antenna Software by W7EL [Электронный ресурс] // EZNEC – Режим доступа до ресурсу: <https://www.eznec.com/>
16. 4nec2 [Электронный ресурс] // QSL – Режим доступа до ресурсу: <https://www.qsl.net/4nec2/>

ДОДАТОК А



Розташування різних режимів роботи спіральних антен залежно від їх розмірів (діаметра, відстані між витками та кута нахилу спіралі)

ДОДАТОК Б

CM Кількість сегментів спіралі $nsh = 30$

CM Діаметр спіралі $dh = 4mm$

CM Радіус спіралі $rh = dh / 2 = 0.002$

CM Діаметр дроту спіралі $d = 1mm$

CM Радіус спіралі $r = d/2 = 0.0005$

CM Кількість витків $n = 6.5$

CM Відстань між витками $space = 8mm$

CM Загальна довжина спіралі $len = n * space = 6.5 * 0.008 = 0.052$

CM Радіус X у нижній частині спіралі $= rh$

CM Радіус Y у нижній частині спіралі $= rh$

CM Радіус X на вершині спіралі $= rh$

CM Радіус Y на вершині спіралі $= rh$

CM Переміщення спіралі в площині $xz = 18 mm$

CM Кількість сегментів дроту $nsw = 3$

CM Частота $freq = 868.0 MHz$

CM -----

CE

SY $nsh=30$

SY $dh=0.004$

SY $rh=dh/2$

SY $d=0.001$

SY $r=d/2$

SY $n=6.5$

SY $space=0.008$

SY $len=n*space$

SY $xz=0.018$

SY $nsw=3$

SY $freq=868.0$

