

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем
від _____ 2025 року, протокол № ____.
Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор
_____ Ігор АНІСІМОВ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА
на тему:
**«ОПТИМІЗОВАНА АНТЕНА ЯГІ УДА ДЛЯ СИСТЕМ
РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ»**

Виконав:

студент 4-го курсу
денної форми навчання
спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка
ОПП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»
Дмитренко Назар Дмитрович _____

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, с.н.с.
Жиров Геннадій Борисович _____

Рецензент:

начальник науково-дослідного відділу
науково дослідного центру ВІКНУ
кандидат технічних наук, с.н.с.
Охрамович Михайло Миколайович _____

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ Назар ДМИТРЕНКО

Київ – 2025

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 36 с., 2 табл., 26 рис., 9 джер., 1 додаток.

ЯГІ-УДА АНТЕННА, РАДІОЕЛЕКТРОННА БОРОТЬБА, СТАНЦІЇ РЕБ,
АНТЕННА.

Об'єкт розроблення – Антенна типу Ягі Уда для систем радіоелектронної боротьби.

Мета роботи – спроектувати та оптимізувати Ягі Уда антену для систем радіоелектронної боротьби та порівняти теоретичний і практичний результат.

Спроектовано 3D модель Ягі Уда антени, яка після певних кроків оптимізації в діапазоні частот 410 – 430 МГц теоретично має КСХ менше ніж 1.3 та імпедансом в 50 Ом.

Використовуючи 3D модель Ягі Уда антени, вона була виготовлена у реальному житті і запрацювала на частоті 420 МГц з КСХ 1.26.

Було проведено експеримент з аналізом діаграми спрямованості антени використовуючи графік S-параметрів S21.

Спроектована 3D модель Ягі Уда антени по характеристикам задовольняє умови для використання її у системах РЕБ

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	4
Вступ	5
1. Антени Ягі-Уда в системах радіоелектронної боротьби.....	6
1. 1. Антенні системи.....	6
1. 2. Призначення антен у РЕБ та основні вимоги.....	8
1. 3. Принципи роботи антени Ягі-Уда.....	11
2. Проектування та оптимізація антени Ягі-Уда	12
2. 1. Початкове проектування.....	12
2. 2. Методика Оптимізації.....	18
2. 3. Результати моделювання.....	20
3. Виготовлення та експериментальна перевірка антени.....	24
3. 1. Технологія виготовлення та умови експерименту.....	25
3. 2. Результати вимірювань і загальна оцінка антени.....	30
Висновки.....	33
Перелік джерел посилання	35
Додаток А. Код Python.....	36

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- РЕБ – радіоелектронна боротьба ;
- КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі;
- c – швидкість світла;
- L_a – довжина активного елемента;
- L_r – довжина рефлектора;
- L_d – довжина кожного директора;
- d_r – відстань від рефлектора до активного елемента
- d_d – відстань від між елементами (диполь – директор1; директор1 – директор2 і т.д.);
- f – частота;
- UHF – Ultra high frequency (надвисока частота)
- λ – довжина хвилі.
- D – найбільший лінійний розмір антени
- $R_{дал}$ - мінімальна відстань до початку дальньої зони

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку засобів зв'язку та зростання інформаційних загроз особливого значення набувають системи радіоелектронної боротьби (РЕБ), які здатні ефективно впливати на роботу радіоелектронних систем супротивника. Одним із ключових елементів таких систем є антени, які визначають технічні характеристики та ефективність застосування РЕБ-комплексів. Серед широкого спектру антен особливу увагу привертає антена типу Ягі-Уда, відома своєю простою конструкцією, високим коефіцієнтом підсилення та чітко вираженою діаграмою спрямованості.

Завдяки цим властивостям антена Ягі-Уда активно застосовується як у цивільних, так і у військових системах. У контексті радіоелектронної боротьби особливо актуальним є її використання в діапазоні частот 410 – 430 МГц – діапазон що охоплює канали професійного радіозв'язку, а також канали управління безпілотними літальними апаратами та іншими технічними засобами. Саме в цьому діапазоні необхідно забезпечити ефективне спрямоване випромінювання або прийом сигналів з метою придушення, перехоплення чи аналізу.

Метою даної дипломної роботи є проектування та оптимізація конструкції антени Ягі-Уда, яка працює у діапазоні частот 410 – 430 МГц, для використання в системах радіоелектронної боротьби. У процесі дослідження буде визначено оптимальні геометричні параметри антени, виконано моделювання її електромагнітних характеристик, а також обґрунтовано доцільність запропонованих рішень.

Об'єктом дослідження є антена Ягі-Уда як складова апаратної частини системи РЕБ. Предметом дослідження – процес оптимізації геометричних параметрів та структури антени з метою досягнення високого коефіцієнта підсилення, вузької діаграми спрямованості та ефективного узгодження в заданому діапазоні частот.

1. АНТЕНИ ЯГІ-УДА У СИСТЕМАХ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ

В розділі наведений огляд сучасних антен Ягі-Уда для систем радіоелектронної боротьби. Розглянуто принципи її роботи, особливості конструкції та основні електричні характеристики. Проаналізовано типові підходи до розрахунку та оптимізації антен Ягі-Уда.

1.1 Антенні системи

Антенні системи є невід'ємною частиною будь-якої радіоелектронної системи, що забезпечує передачу або прийом електромагнітних хвиль. Антена виконує функцію переходу від енергетичних параметрів високочастотного тракту до простору та навпаки, що робить її ключовим елементом у задачах радіозв'язку, радіолокації, супутникової навігації, радіомоніторингу та електронної боротьби.

Згідно з класичною теорією антен, будь-яка антена описується через сукупність своїх основних характеристик: діаграму спрямованості, коефіцієнт підсилення, смугу пропускання, хвильовий опір, ефективність та поляризацію. Розуміння та правильне врахування цих параметрів дає змогу забезпечити оптимальну роботу радіосистеми у конкретних умовах експлуатації.

1. Діаграма спрямованості (ДС)

Діаграма спрямованості відображає просторовий розподіл потужності випромінювання антени. Вона визначається як відносна амплітуда електромагнітного поля, випроміненого антеною, у різних напрямках на фіксованій відстані в дальній зоні. Діаграма може бути представлена в прямокутних або полярних координатах, як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах. Основними характеристиками ДС є ширина головного пелюстка, рівень бічних пелюсток та напрям головної осі випромінювання.

2. Коефіцієнт підсилення (Gain)

Коефіцієнт підсилення характеризує здатність антени зосереджувати енергію у певному напрямку у порівнянні з ідеальним ізотропним

випромінювачем. Його вимірюють у децибелах (дБ) відносно ізотропного випромінювача (dBi) або відносно напівхвильового диполя (dBd). Підсилення прямо пов'язане з напрямленістю антени: чим вужча діаграма спрямованості, тим вищий коефіцієнт підсилення.

3. Хвильовий опір та узгодження

Хвильовий опір антени — це характеристичне значення опору, що визначає відношення між напругою і струмом на вході антени при випромінюванні хвилі. Для забезпечення максимального передавання енергії між передавачем та антеною необхідне узгодження хвильового опору антени із хвильовим опором фідера (зазвичай 50 або 75 Ом). Невідповідність цих опорів призводить до часткового відбиття енергії, що оцінюється через коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ, VSWR).

4. Поляризація

Поляризація визначає орієнтацію вектора електричного поля випромінюваної хвилі. Розрізняють лінійну (горизонтальну та вертикальну), кругову (праву та ліву) та еліптичну поляризацію. Для ефективного прийому сигналу поляризація приймальної антени має збігатися з поляризацією сигналу.

5. Зони антени: ближня та дальня

Простір навколо антени умовно поділяють на ближню (індуктивну та перехідну) та дальню зони. У ближній зоні електромагнітне поле є неоднорідним, і зв'язок між напругою та струмом складний. У дальній зоні поле стає хвильовим, із чіткою сферичною симетрією, і саме в цій зоні вимірюють основні характеристики антени.

6. Класифікація антен

Антені поділяють за різними ознаками:

- за принципом дії: активні та пасивні;
- за формою: лінійні (диполі), площинні (решітки), об'ємні (спіральні);
- за направленістю: всеспрямовані, направлені, наднаправлені;
- за способом живлення: симетричні та несиметричні.

1.2. Призначення антен у РЕБ та основні вимоги

Системи радіоелектронної боротьби (РЕБ) призначені для забезпечення переваги у сфері радіочастотного спектра шляхом виявлення, придушення, дезінформації або повного припинення роботи ворожих радіоелектронних засобів. Від ефективності антенних пристроїв у таких системах залежить якість прийому та передачі радіосигналів, швидкість реагування на загрози, а також діапазон дії.

Антени в системах РЕБ виконують дві ключові функції – радіоперехоплення (прийом сигналів супротивника для їх подальшого аналізу або напрямленої пеленгації) та активне придушення (передача сигналів завад з метою зниження ефективності або повного блокування роботи радіоелектронних засобів противника).

До антен, що застосовуються в РЕБ, висуваються специфічні вимоги, які обумовлені характером бойового застосування, такими як високий коефіцієнт підсилення, що дозволяє забезпечити ефективну дальність впливу на ціль при передаванні, а також надійне виявлення слабких сигналів при прийманні, вузька діаграма направленості, що забезпечує чітко направлені дії у напрямку цілі та мінімізацію впливу на суміжні частотні області або несуміжні об'єкти. Також механічна надійність і мобільність є важливим аспектом для антени в РЕБ, бо вони часто експлуатуються в умовах жорсткого клімату, на рухомих платформах (автомобіль, безпілотник, корабель), тому мають бути стійкими до вібрацій, пилу, вологи тощо.

Ще одним важливим фактором є узгодження антени із системами живлення та комутації, а також можливість інтеграції з фазованими решітками або цифровими обробниками сигналів.

У системах радіоелектронної боротьби (РЕБ) антени є критично важливими елементами, які забезпечують ефективне випромінювання перешкод, приймання сигналів противника, а також виконання функцій виявлення та пеленгації. Вибір типу антени напряму залежить від конкретного завдання —

активне придушення, радіоперехоплення, постановка пасивних чи активних перешкод, або ведення радіорозвідки.

Основні типи антен, що застосовуються в РЕБ-системах:

1. Широкозмугові антени. Цей тип антен призначений для роботи у широкому діапазоні частот. До них належать:

- Log-periodic (логоперіодичні) антени — мають стабільні характеристики в широкому діапазоні частот і добре підходять для розвідки та придушення сигналів з невідомою частотою.
- Spiral (спіральні) антени — компактні широкозмугові пристрої з круговою поляризацією, що дозволяє ефективно приймати сигнали від об'єктів з невідомою орієнтацією антен.

2. Спрямовані антени. Спрямованість є однією з ключових характеристик антен у РЕБ. До них належать:

- Антени Ягі-Уда — забезпечують високий коефіцієнт підсилення та вузьку діаграму спрямованості, що є особливо корисним для точкового подавлення або супроводу об'єктів.
- Фазовані антени (ФАР) — дозволяють електронне сканування без механічного переміщення, мають високу швидкодію, адаптивність та придатні для створення багатофункціональних РЕБ-комплексів.
- Параболічні рефлектори — використовуються для надвисокочастотних каналів РЕБ, де потрібна надвисока спрямованість і великий підсилення.

3. Всенаправленні антени. Такі антени застосовуються у випадках, коли необхідно забезпечити контроль простору в усіх напрямках або передавати сигнали перешкод у широкому секторі. Найчастіше використовуються:

- Штирвові антени (whip-антени)
- Диполі та рамкові антени — для приймання широкого спектра сигналів або передачі завад у ближній зоні.

4. Решітки з адаптивною спрямованістю. Сучасні комплекси РЕБ можуть включати адаптивні антенні решітки, які автоматично змінюють діаграму спрямованості в залежності від умов сигналу. Вони дозволяють ефективно

придушувати конкретні джерела, зменшуючи побічні ефекти на суміжні частоти та просторові напрямки.

Отже, при виборі антени для РЕБ важливо враховувати не лише робочий діапазон частот, а й тип місії (заглушення, пеленгація, сканування), умови експлуатації (мобільність, клімат, швидкість розгортання), поляризацію сигналів та необхідну точність наведення. Враховуючи всі ці аспекти, антена типу Ягі-Уда була обрана для цієї роботи як компромісне рішення, що поєднує простоту конструкції, ефективність спрямованого випромінювання та відносну технологічну доступність.

1.3. Принцип роботи антени Ягі-Уда

Антени типу Ягі-Уда є вузькосмуговою направленою антеною, яка широко використовується завдяки своїй простоті конструкції та високій ефективності. Її структура зазвичай складається з одного збуджуваного (активного) елемента, одного рефлектора, що розташовується позаду активного елемента, та певної кількості директорів, перед ним по лінії основного випромінювання.

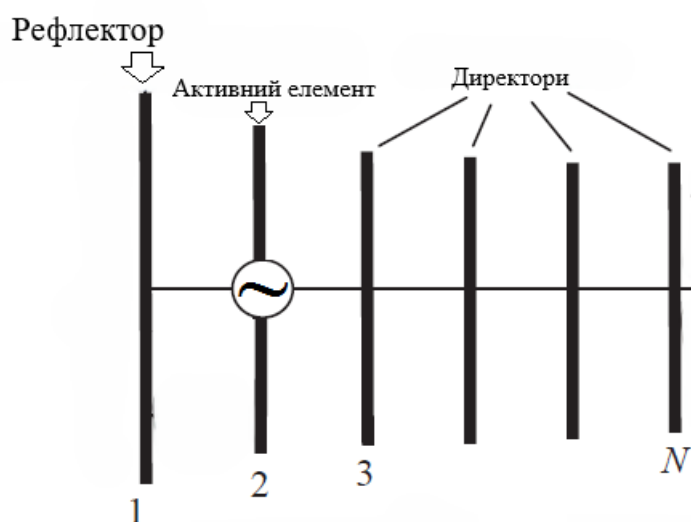


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення структури антени Ягі-Уда

В роботі [2] описано, що фізика роботи такої антени базується на взаємодії електромагнітного поля, що створюється активним елементом, із пасивними елементами (рефлектором та директорами). Рефлектор трохи довший за активний елемент і розташований так, щоб відбивати хвилі у напрямку вперед, що допомагає зменшити випромінювання в зворотному напрямку. Директори, навпаки, коротші і сприяють фокусуванню енергії у заданому ними напрямі. Завдяки такому поєднанню елементів створюється спрямована діаграма випромінювання з підвищеним коефіцієнтом підсилення. Також кількість директорів впливає на характеристики антени, такі як коефіцієнт підсилення, ширина діаграми спрямованості, відношення переднього до зворотнього випромінювання та смугу пропускання.

2. ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ АНТЕНИ ЯГІ-УДА

2.1. Початкове проектування

Для початку треба визначити в якому частотному діапазоні ми будемо проектувати антену. Антени Ягі-Уда найкраще працює на відносно не високих частотах, зазвичай до 1-1.5 ГГц. Системи РЕБ зазвичай працюють в VHF, UHF, L-, S-, та C-діапазонах. Для проекту було обрано UHF діапазон (300 – 1000 МГц) та робочий частотний спектр від 400 МГц до 470 МГц, оскільки цей спектр широко використовується для військового зв'язку та систем керування [4]. У цьому діапазоні також забезпечується оптимальний баланс між розмірами антени, ефективністю спрямованої дії та технічною простотою реалізації.

Проектування антени буде для частоти 433 МГц бо це одна з найрозповсюдженіших частот у UHF діапазоні. Для того, щоб розрахувати розміри для усіх складових антени, було використано метод, описаний Карлом Ротгаммелем [1], який ґрунтується на емпірично підібраних оптимальних параметрах взаємного розташування елементів антени для досягнення максимальної ефективності. Усі розрахунки використовують значення довжини хвилі, що знаходиться за формулою [1.1]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [1.1]$$

Для того, щоб визначити розміри елементів, використовуються формули [1.2]:

$$\begin{aligned} L_a &= 0,47\lambda \div 0,49\lambda & [1.2] \\ L_r &= (1,05 \div 1,1) \times L_a \\ L_d &= (0,9 \div 0,95) \times L_a \end{aligned}$$

Для того, щоб визначити відстань між елементами, використовуються формули [1.3]:

$$\begin{aligned} d_r &= 0,15\lambda \div 0,25\lambda & [1.3] \\ d_d &= 0,3\lambda \div 0,45\lambda \end{aligned}$$

де L_a - довжина активного елемента, L_r - довжина рефлектора, L_d - довжина кожного директора, d_r - відстань від рефлектора до активного елемента, d_d - відстань між елементами (диполь - директор1; директор1 - директор2 і т.д.).

У процесі проектування антени Ягі-Уда для задач радіомоніторингу було прийнято рішення використати конфігурацію з шістьма директорами. Збільшення кількості директорів у антені Ягі-Уда позитивно впливає на спрямованість, оскільки кожен додатковий директор зменшує бічні пелюстки та концентрує енергію основного променя. Шість директорів забезпечують оптимальний компроміс між покращенням характеристик антени, та конструктивною складністю, розмірами й узгодженням у робочій смузі частот.

Після обчислень отримано розміри для усіх значень та записано їх як параметри в програмі для моделювання CST Studio Suite. Серед найбільш відомих програмних комплексів для моделювання антенних структур можна виділити такі:

- 4nec2 — безкоштовне програмне забезпечення, що реалізує метод моментів (МоМ) для розрахунку провідних антен. Попри обмеження щодо геометричної складності моделей, цей пакет залишається популярним завдяки простоті використання та доступності.
- HFSS (Ansys High Frequency Structure Simulator) — один із найпотужніших інструментів для 3D моделювання високочастотних пристроїв, що використовує метод скінчених елементів (FEM). Забезпечує високу точність, однак вимагає значних обчислювальних ресурсів.
- FEKO — комерційне середовище моделювання, яке підтримує декілька чисельних методів (МоМ, FEM, FDTD тощо). Часто використовується у телекомунікаціях, автомобільній та аерокосмічній галузях.
- CST Studio Suite — універсальна платформа для 3D моделювання електромагнітних процесів, яка об'єднує декілька методів обчислення (метод кінцевих інтегральних елементів, FDTD, TLM тощо) в одному

інтерфейсі. CST підтримує повноцінне моделювання антен, фідерних систем, узгодження, параметричну оптимізацію та візуалізацію діаграм направленості.

- MMANA-GAL — це програма для розрахунку та аналізу антен. Будь-яких антен, які можна представити як довільний набір тонких провідників. Розрахунок виконується методом моментів. Обчислювальною основою програми є MININEC3 (перероблена та модифікована відповідно до сучасних засобів).

У рамках цієї дипломної роботи для моделювання антени типу Ягі-Уда було обрано CST Studio Suite. Основними причинами цього вибору є:

- Інтуїтивний інтерфейс, який дозволяє швидко створювати тривимірні моделі антен, задавати матеріали, граничні умови та режими збудження;
- Висока точність розрахунків у діапазоні UHF, що забезпечується за рахунок використання гібридних чисельних методів;
- Потужні засоби оптимізації, які дозволяють автоматично підбирати геометричні параметри антени відповідно до заданих цілей (наприклад, мінімізація КСХ або досягнення імпедансу 50 Ом на визначеній частоті);
- Вбудовані інструменти візуалізації діаграми направленості, розподілу струмів, електричних і магнітних полів, які надають повне уявлення про роботу антени.

Завдяки вищезгаданим можливостям CST Studio Suite є оптимальним вибором для моделювання антен у наукових і прикладних завданнях, де потрібен баланс між точністю, гнучкістю і зручністю використання.

Parameter List	
Name	Expression
Ldr	= 344
Ldp	= 330
Ld1	= 302
Ld2	= 298
Ld3	= 294
Ld4	= 290
Ld5	= 286
Ld6	= 283
Sdr	= 0
Sdp	= 138
Sd1	= 190
Sd2	= 315
Sd3	= 464
Sd4	= 637
Sd5	= 831
Sd6	= 1039

Рисунок 2.1 – Параметри з розмірами антени записані в CST Studio Suite.

Після визначення розмірів згідно схемі на рисунку 2.2 побудовано 3D модель у програмному забезпеченні для моделювання.

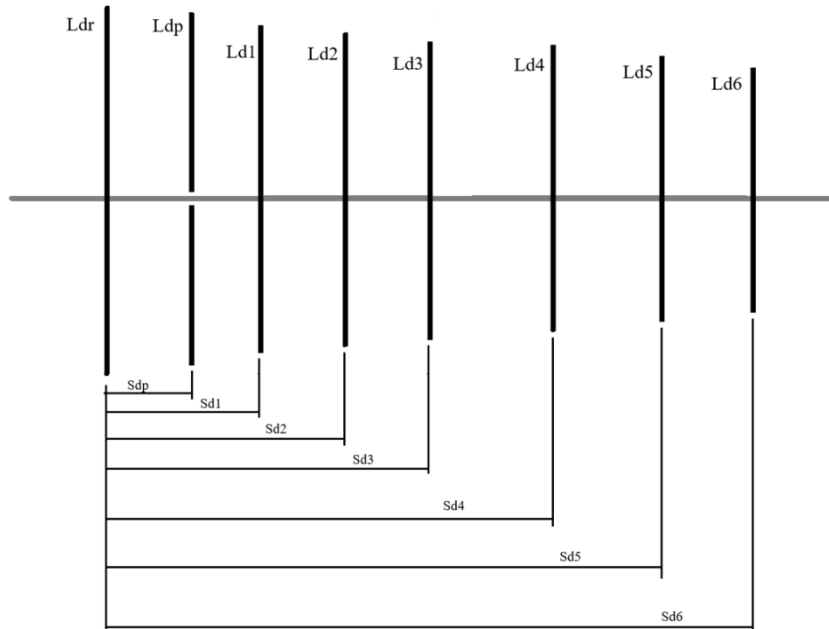


Рисунок 2.2 – Схема для побудови 3D модель антени.

При побудові 3D моделі діаметр елементів був обраний 8 міліметрів та товщина прямокутного тримача цих елементів (бума) – 15 міліметрів.

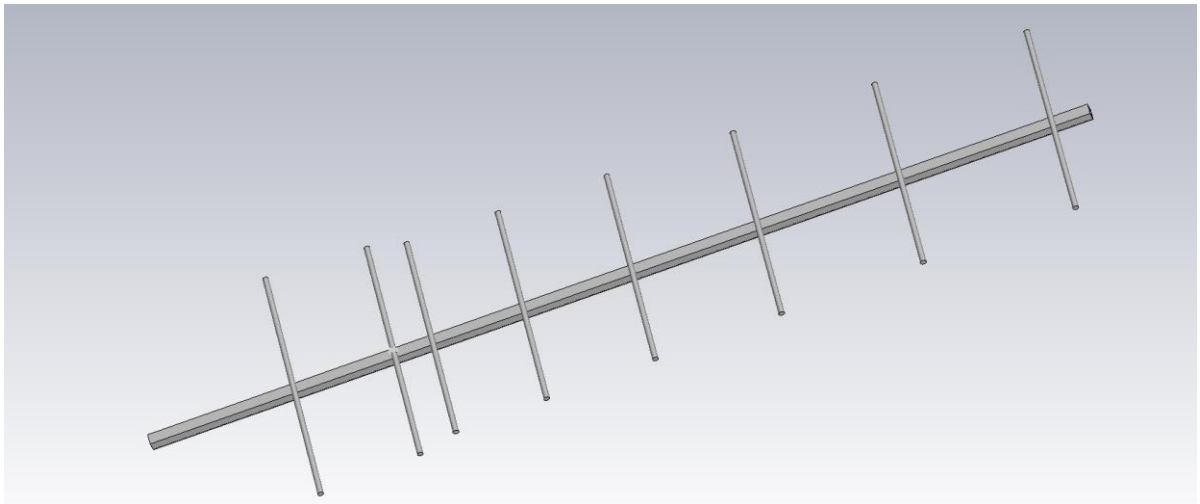


Рисунок 2.3 - 3D модель антени.

Також, для більш точного моделювання, було виставлено матеріал, з якого будуть ці елементи виготовлені при конструюванні в живу – алюміній. Елементи розташовані від буму на відстані 2.5 міліметра. Тепер переходимо до симуляції її роботи та результатів.

Аналізуючи графік S-параметрів (S11, Рисунок 2.4) можна зробити висновок, що на частоті 433 МГц значення параметра S11 дорівнює -11.5 дБ, що є поганим показником, оскільки це значення означає, що значна частина вхідної потужності відбивається у зворотному напрямку.

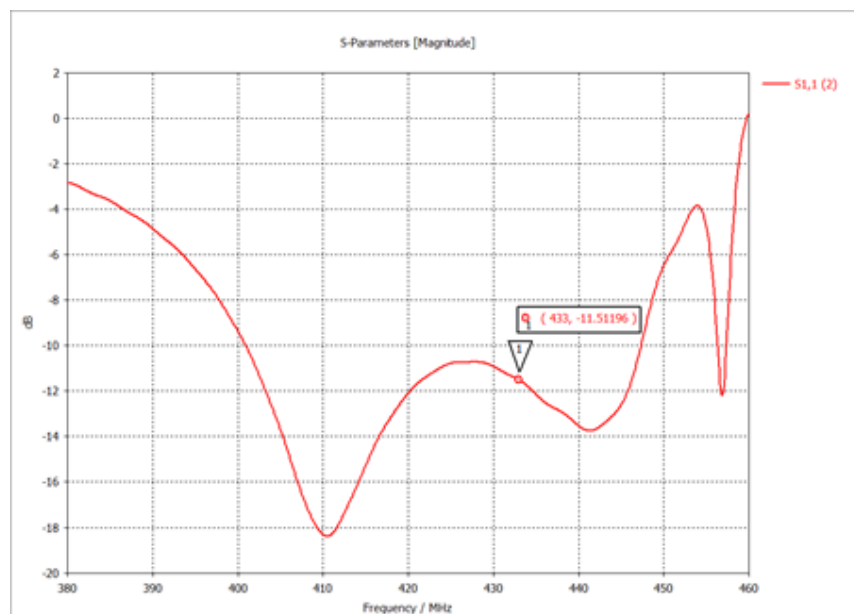


Рисунок 2.4 – Графік S-параметрів (S11).

Згідно з графіку КСХ (рисунок 2.5), який був отриманий після симуляції, можна помітити що значення КСХ на частоті 433 МГц дорівнює 1.72, що не є задовільним для нормальної працездатності антени у реальному житті. Але можна помітити, що на частоті 410 МГц КСХ дорівнює 1.27 що є задовільним показником для працездатності антени.

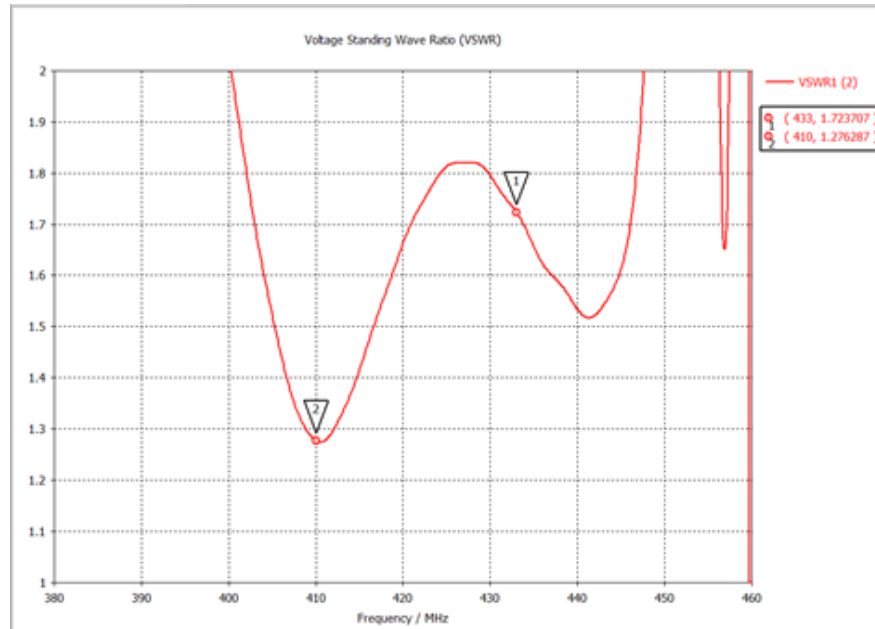


Рисунок 2.5 – Графік КСХ.

Згідно з рисунку 2.6 та рисунку 2.7 видно що імпеданс та діаграма направленості антени задовольняють умові працездатності антени. Імпеданс залишається на рівні 50 Ом, а діаграма направленості вузько направлена.

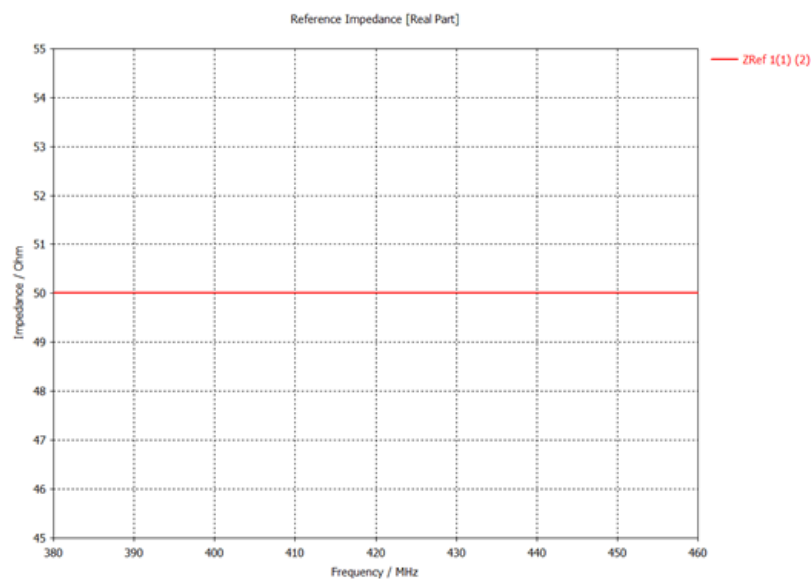


Рисунок 2.6 - Графік імпедансу антени.

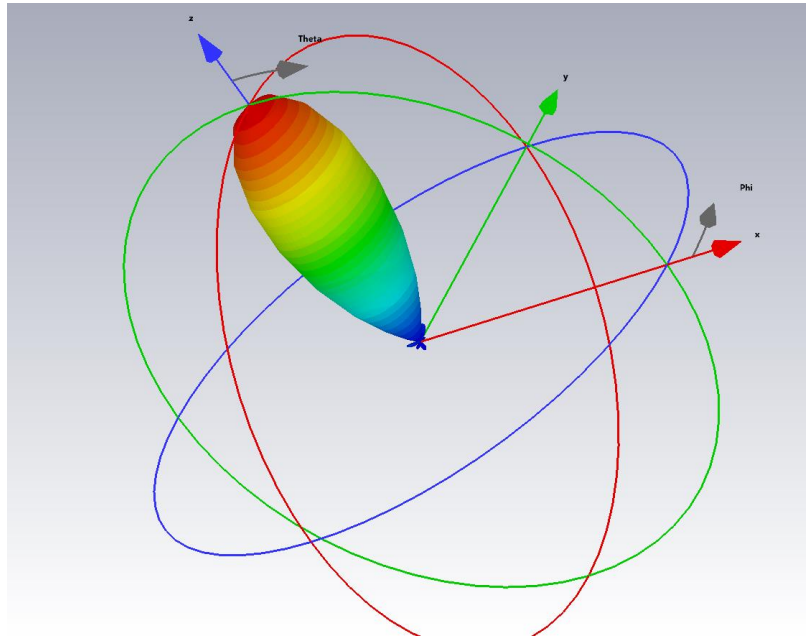


Рисунок 2.7 – 3D модель діаграми направленості.

З отриманих результатів можна зробити висновок, що на даний момент антена не працює на запланованій частоті. Однією з причин може бути те, що в 3D моделі було використано алюміній, як матеріал елементів антени. Алюміній не такий електропровідний матеріал як мідь і тому має більше втрат на поверхні, але він більш доступний та легший. Було обрано алюміній оскільки цей матеріал як компроміс між ефективністю і ціною.

2.2. Методика оптимізації

Для того щоб покращити роботу антени на запланованій частоті було використано функціонал програмного забезпечення CST Studio Suite – **Optimizer**. Це інструмент для автоматичного пошуку оптимальних параметрів конструкції антени, щоб досягти її заданих характеристик. Optimizer працює за принципом варіативного моделювання: користувач зазначає, які параметри конструкції можуть змінюватись, і формулює цільову функцію — наприклад, мінімізувати відбиту потужність (S_{11}) на певній частоті або забезпечити КСХ нижче заданого порогу. Після цього запускається серія автоматичних симуляцій, у яких CST змінює задані параметри в межах визначеного діапазону й оцінює результат кожного варіанта. Для прийняття рішень

програма може використовувати різні чисельні методи оптимізації — зокрема градієнтний пошук, еволюційні алгоритми (як-от генетичний алгоритм), метод рою частинок, або ж простий перебір сітки параметрів. Вибір методу залежить від кількості змінних, складності моделі та вимог до точності й швидкості. В нашому випадку це метод **Trust Region Framework (TRF)** — детермінований чисельний алгоритм локального пошуку, який ітеративно змінює параметри в околі поточного розв’язку для зменшення функції помилки. Для цього потрібно відкрити вікно Optimizer у верхньому меню програми. Після цього у вікні, що відкрилося (Рисунок 2.8), відмічаємо ті параметри які будуть змінюватись для оптимізації.

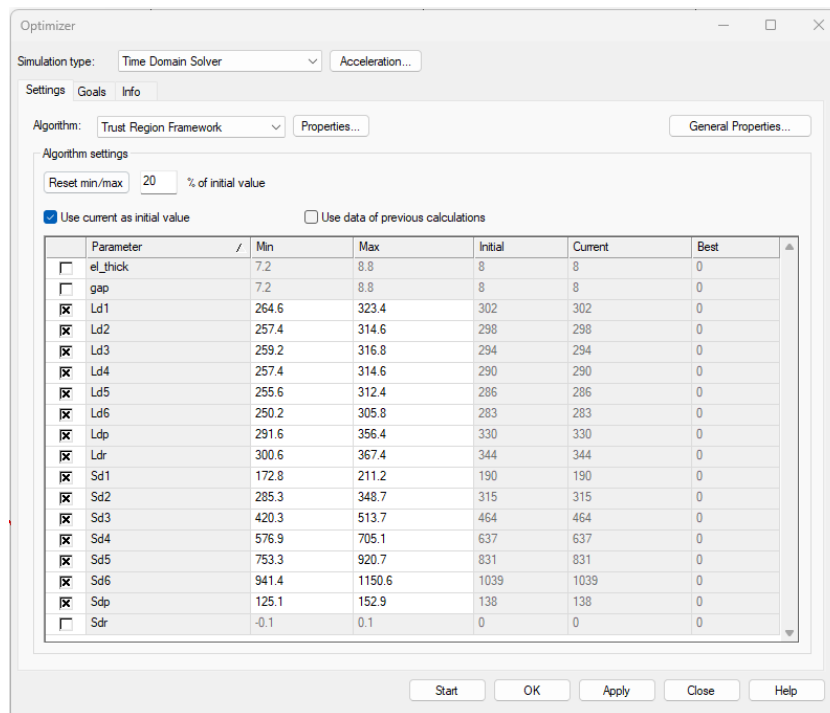


Рисунок 2.8 – Вікно вкладки Optimizer.

Наступним кроком потрібно виставити мету оптимізації у вкладці Goals (Рисунок 2.9). В даному випадку метою було досягнення значення -27 дБ на частоті 433 МГц на графіку S-параметрів (S11). Параметрами, які автоматично змінюватимуться для оптимізації, були розміри основних елементів та відстань між ними.

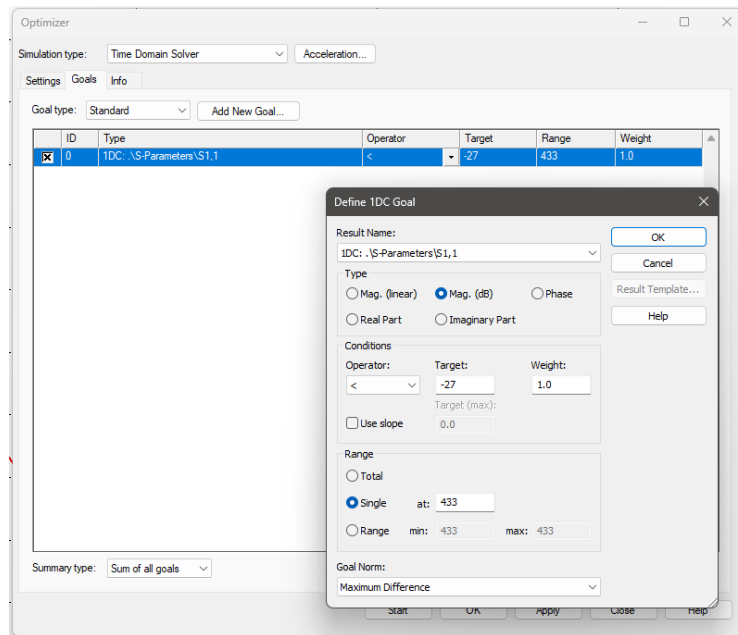


Рисунок 2.10 – Вкладка Goals у вікні Optimizer.

2.3. Результати моделювання

Після завершення оптимізації, параметри антени змінились автоматично на більш (Рисунок 2.11). Тепер запустивши симуляцію її роботи можемо порівняти результати з неоптимізованою антеною.

Parameter List		
	Name	Expression
🔍	Ldr	= 333
🔍	Ldp	= 330
🔍	Ld1	= 288
🔍	Ld2	= 288
🔍	Ld3	= 282
🔍	Ld4	= 284
🔍	Ld5	= 291
🔍	Ld6	= 281
🔍	Sdr	= 0
🔍	Sdp	= 137
🔍	Sd1	= 194
🔍	Sd2	= 320
🔍	Sd3	= 460
🔍	Sd4	= 635
🔍	Sd5	= 856
🔍	Sd6	= 1049

Рисунок 2.11 – Розміри антени після оптимізації.

Після симуляції оптимізованої антени на графіку КСХ (Рисунок 2.12) видно що її КСХ в діапазоні від 412.7 МГц до 436.6 МГц тримається на рівні нижче 1.3, що є гарним показником працездатності антени.

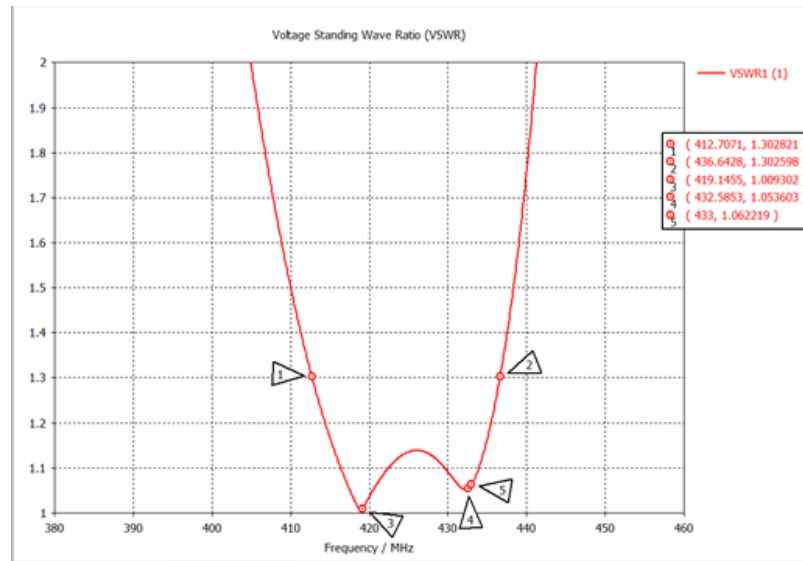


Рисунок 2.12 – Графік КСХ оптимізованої антени.

Графік імпедансу та 3D модель діаграми спрямованості залишилась в такому ж задовільному стані після оптимізації (рисунок 2.13 та рисунок 2.14 відповідно).

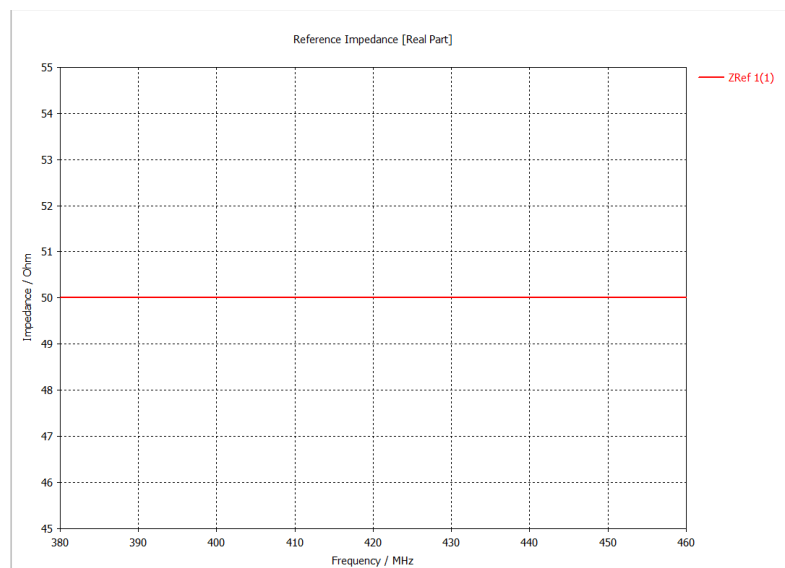


Рисунок 2.13 – Графік імпедансу після оптимізації.

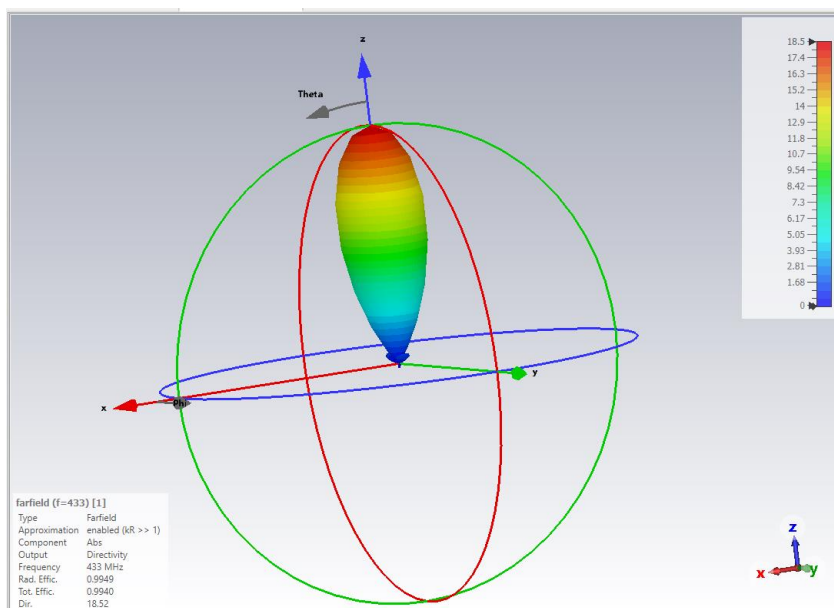


Рисунок 2.14 - 3D модель діаграми спрямованості після оптимізації.

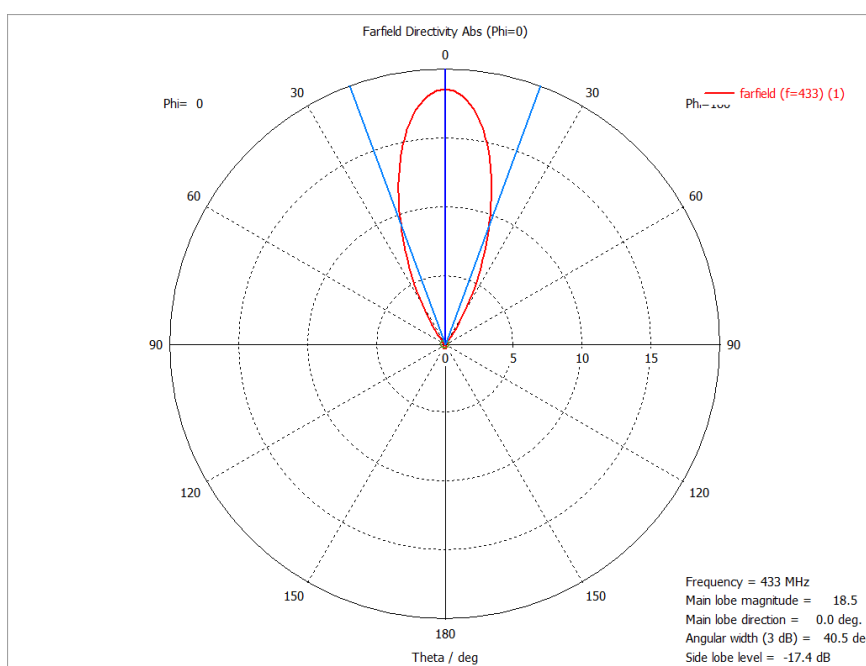


Рисунок 2.15 – 2D діаграма спрямованості.

На графіку S-параметрів оптимізованої антени (S11, Рисунок 2.16) можна спостерігати, що значення S11 в смузі частот 430 МГц – 433 МГц менше або дорівнює -30 дБ що є хорошим результатом для правильної роботи антени.

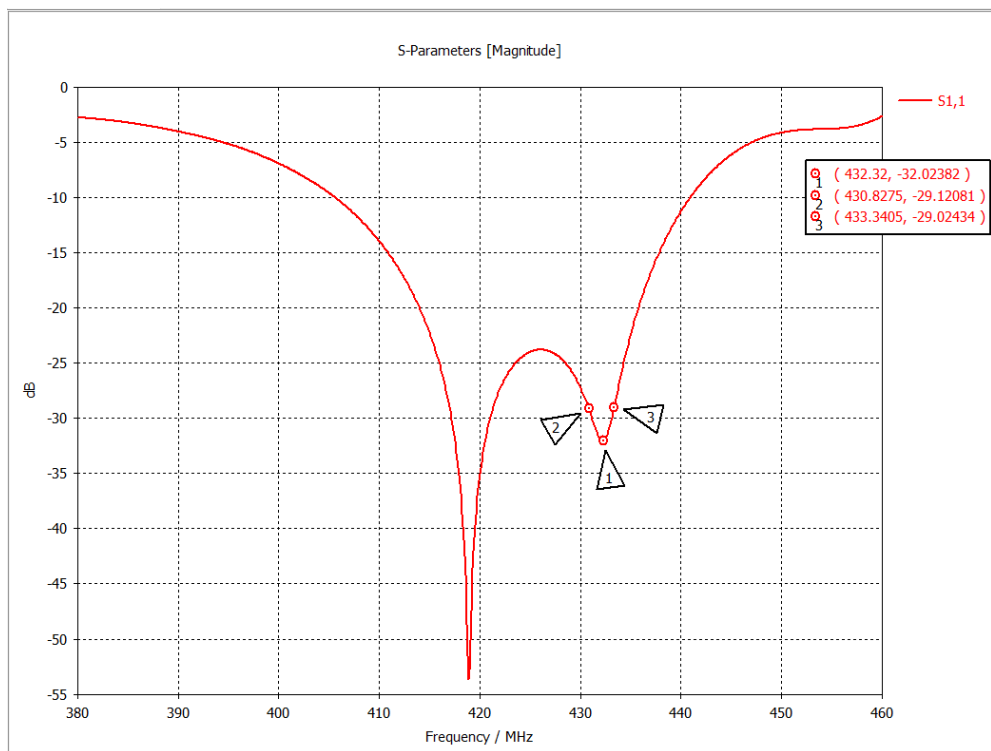


Рисунок 2.16 - Графік S-параметрів оптимізованої антени.

З отриманих результатів після оптимізації можна зробити висновок, що з оптимізованими розмірами антена має набагато кращі характеристики, ніж з попередніми. На запланованій частоті вона має задовільні значення КСХ, вузьку діаграму направленості, що є основними показниками для якісної роботи антени.

3. ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА

3.1 Технологія виготовлення та умови експерименту

Для виготовлення антени були використані наступні матеріали (Рисунок 3.1):

- стрижень алюмінієвий діаметром 8 міліметрів, довжина - 2 метри ;
- трубка квадратна алюмінієва діаметром 15 міліметрів, довжина – 2 метри;
- пластикова панель товщиною 2.5 міліметра;
- кабель коаксіальний RG58 довжиною 2.5 метра;
- скоба тримач однолапкова діаметром 8 міліметрів 32 шт.



Рисунок 3.1 – Матеріали для виготовлення антени.

Спочатку з алюмінієвого стрижня було вирізано вісім основних елементів антени за розмірами L_{dr} , L_{dp} , L_{d1} - L_{d6} . Також з пластикової пластини було вирізано 8 елементів квадратного вигляду діаметром 100 міліметрів. На квадратній трубці було розмічено відстані між директорами, диполем та рефлектором за розмірами S_{dr} , S_{dp} , S_{d1} – S_{d6} для того, щоб потім розташувати ці елементи по відповідним точкам. Наступним кроком, це розміщення усіх елементів, крім диполя, на пластикових квадратах максимально рівно за допомогою скоб тримачів.

Щоб розташувати диполь для початку ми повинні підготувати його для пайки до кабелю. Для цього ділимо активний елемент на дві частини так, щоб створити вільне місце у 8 міліметрів між двома частинами. Потім на одному з кінців обох частин просвердлили тонким свердлом глибокий отвір в який щільно засовуємо шматочки мідного кабелю для того щоб потім була можливість спаяти ці два кінці до кабелю, оскільки алюміній дуже складно спаяти через хімічні властивості алюмінію.

Після закріплення диполя на пластиковий квадрат, кріпимо ці елементи відповідно маркерам, які були позначені раніше. Далі потрібно оголити кабель так як зображено на рисунку 3.2 та припаяти центральну жилу та екран до обох кінців диполю з мідними вставками.



Рисунок 3.2 – Вигляд оголеного коаксіального кабелю

Тепер антена готова до тестування та проведення експериментів (Рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Вигляд антени після її виготовлення

Для того щоб перевірити працездатність антени потрібно підключити її до спеціального пристрою – векторного аналізатору. В нашому випадку це Nano-VNA-F V3 (Рисунок 3.4). NanoVNA-F V3 є портативним двоканальним векторним аналізатором з частотним діапазоном від 50 кГц до 3 ГГц, що повністю охоплює обраний робочий спектр (410–430 МГц). Пристрій підтримує вимірювання таких параметрів, як КСХ, імпеданс та S-параметри.

Однією з ключових переваг NanoVNA-F V3 є наявність екрану з кольоровим графічним інтерфейсом, що дозволяє проводити вимірювання в режимі реального часу без необхідності підключення до комп'ютера. Водночас, за допомогою USB-інтерфейсу можлива повноцінна синхронізація з ПК для побудови детальних графіків, збереження даних та аналізу результатів у спеціалізованому програмному забезпеченні.



Рисунок 3.4 – Векторний аналізатор Nano-VNA-F V3

Після підключення антени до векторного аналізатора можна спостерігати графік КСХ та імпеданс антени на екрані приладу (Рисунок 3.5).

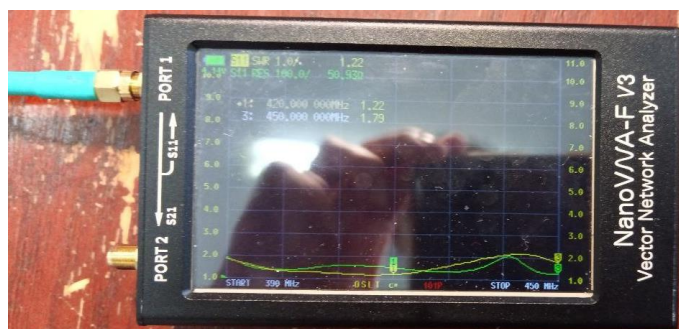


Рисунок 3.5 – Графік КСХ та імпедансу антени на екрані векторного аналізатору.

З графіку видно що імпеданс в 50 Ом тримається на частоті 420 МГц з КСХ 1.22 що, враховуючи те що тестування відбувається в закритому приміщенні, а антена направлена у бік вікна, є гарним показником для такого рівня антени.

Також завдяки даному приладу можна перевірити діаграму спрямованості антени. Це можливо завдяки графікам S-параметрів S12 та S21 – параметри передачі. Вони відображають залежність переданої потужності від частоти. У контексті антен, де один порт підключений до передавальної антени, а другий — до приймальної, значення S21 визначає, яку частку сигналу, що випромінюється першою антеною, приймає друга антена. Для цього нам потрібна ще одна антена яка буде передавати сигнал, а обертаючи нашу антену ми зможемо по графіку S21 спостерігати змінення значення параметру Gain.

Антена, яка буде передавати сигнал на виготовлену Ягі-Уда антену, це штирєва (whip-type) антена (Рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Штирєва (whip-type) антена.

Для того щоб отримати максимально точні результати антена була розміщена на саморобному кріпленню, яке дозволяє антені обертатися на 360 градусів (Рисунок 3.7). На нижньому дерев'яному диску розмічена градусна сітка для фіксування куту повороту антени.



Рисунок 3.7 – Антена Ягі-Уда закріплена на саморобному кріпленні.

Після того як антена Ягі-Уда була прикріплена на кріплення, потрібно розташувати штиркову (whip-type) антену на відстані дальньої зони антени Ягі-Уда. У дальній зоні електромагнітне поле антени можна вважати плоскою хвилею, а просторовий розподіл поля не залежить від відстані — лише від напрямку. Саме тому у цій зоні проводяться вимірювання діаграми спрямованості, коефіцієнта підсилення та поляризації. Дальна зона розраховується за формулою (3.1):

$$R_{\text{дал}} \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.1)$$

де D - найбільший лінійний розмір антени.

В нашому випадку після розрахунку $R_{\text{дал}}$ повинно бути більше або дорівнювати 2,27 м. Розташували антену на межі дальньої зони і це означає що усі наступні результати будуть коректними (Рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Розташування антен під час проведення експерименту.

Суть експерименту полягає в тому, що повертаючи антену що приймає сигнал на певну кількість градусів та спостерігати як змінюється значення Gain графіку S-параметрів S_{21} . Повертатись антена під час експерименту буде в обидві сторони на 10 – 90, 135, 180 градусів. Це дозволить перевірити, чи буде зменшуватись значення Gain зі збільшенням куту повороту приймаючої антени.

3.2 Результати вимірювань і загальна оцінка антени

Після виконання експерименту було зафіксовано його результати (Рисунок 3.9, таблиця 3.1 – 3.2).

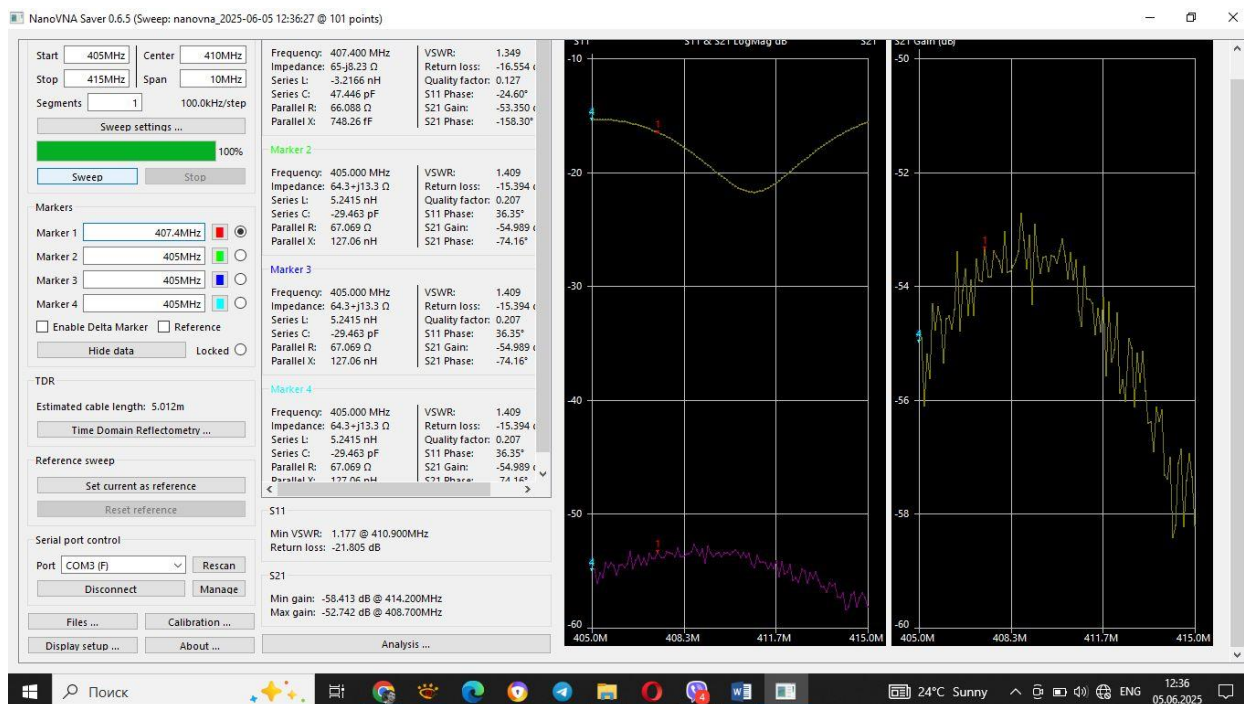


Рисунок 3.9 – Графік при направленні приймаючої антени в напрямок передавальної.

Оглянувши графіки повороту приймаючої антени в ліву сторону і записавши результати у таблицю 3.1, можна спостерігати що зі збільшенням куту повороту значення Gain графіку S21 поступово зменшується від початкового значення, коли антена була направлена в сторону антени передавача. Це означає що при повороті приймальної антени, їй передається менше потужності і звужується діаграма спрямованості. Враховуючи умови виконання експерименту результат задовільний.

кут повороту вліво, градуси	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	135	180
min gain, дБ	-58.4	-59.1	-61.6	-69.9	-73.3	-74.4	-75.4	-76.9	-78.4	-78.6	-82.3	-84.1

Таблиця 3.1 – результати вимірювань при повороті в ліво

Після повороту приймаючої антени в праву сторону оглянувши графіки та записавши результати у таблицю 3.2, видно, що як і у випадку повороту в ліву, їй передається менше потужності і звужується діаграма спрямованості.

кут повороту вправо, градуси	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	135	180
min gain, дБ	-58.4	-58.6	-61.6	-72.5	-74.1	-75.3	-76.9	-77.6	-78.5	-79.96	-84.6	-83.8

Таблиця 3.2 – результати вимірювань при повороті вправо

Маючи усі данні можемо використати їх для побудови 2D діаграми спрямованості. Було використано мову програмування Python для написання коду, який в результаті зберігатиме зображення 2D діаграми спрямованості на пристрій з якого запускається код (Додаток А).



Рисунок 3.10 - 2D діаграма спрямованості визначена після експерименту

Оглянувши отриману діаграму спрямованості, можемо поміти що вона сильно відрізняється від модельованої. Це може бути пов'язане з тим, що для вимірювання та отримання діаграми спрямованості, антена повинна знаходитись у ідеальних умовах для цього. Зазвичай для цього антenu розташовують у спеціальній безеховій камері або у відкритому вільному просторі без споруд. В нашому ж випадку антена тестувалась у жилій місцевості біля споруд.

Отримавши такий результат після виготовлення та тестування антени можна зробити висновок, що, враховуючи конструкцію, умови тестування, та якість виготовлення, було отримали працюючу антenu в частотному діапазоні 410 – 420 МГц, що трохи менше від запланованої робочої частоти але допустима похибка, оскільки антена все ще працює в робочому частотному спектрі від 400 МГц до 470 МГц.

ВИСНОВКИ

При виконанні бакалаврської кваліфікаційної роботи було спроектовано, оптимізовано, виготовлено та експериментально досліджено антену типу Ягі-Уда, яка працює в діапазоні частот 410–430 МГц, для застосування в системах радіоелектронної боротьби.

На першому етапі було проведено аналіз особливостей антенних систем, що використовуються у комплексах РЕБ, а також визначено ключові вимоги до конструкцій подібного типу. Було встановлено, що антени Ягі-Уда є доцільним рішенням для таких задач завдяки простоті реалізації, високому коефіцієнту підсилення та вузькій діаграмі спрямованості.

Далі були виконані початкові розрахунки геометричних параметрів антени. Розраховані значення було використано для побудови 3D-моделі антени у середовищі CST Studio Suite. Після попереднього моделювання стало очевидним, що антена потребує оптимізації для покращення КСХН та точності узгодження.

За допомогою вбудованого модуля Optimizer було проведено автоматичну оптимізацію антени, що дозволило досягти значення КСХ < 1.3 у діапазоні 412,7–436,6 МГц, а також покращити значення S_{11} до -30 дБ на частоті 433 МГц. Діаграма спрямованості після оптимізації зберегла вузьке спрямування та симетричність, а імпеданс залишився близьким до 50 Ом, що свідчить про ефективне узгодження з лінією живлення.

Після моделювання антена була виготовлена з алюмінієвих та пластикових елементів, з урахуванням обраних геометричних параметрів. У результаті експериментального тестування, проведеного із застосуванням векторного аналізатора NanoVNA-FV3, було підтверджено працездатність антени в смузі частот 417 МГц - 420 МГц з КСХ 1.22 та імпедансом 50 Ом. Крім того, було проведено експеримент з обертанням приймальної антени, який підтвердив вузьку та симетричну діаграму направленості, характерну для антен Ягі-Уда.

Таким чином, поставлену у роботі мету — проектування та оптимізація антени Ягі-Уда для систем РЕБ з подальшим виготовленням та перевіркою її основних параметрів — досягнуто. Отримані результати засвідчують, що розроблена антена, при розробці з використанням професійних засобів виготовлення та певних покращень для її конструкції, є придатною для застосування у складі РЕБ-комплексів, де важливі спрямованість, узгодження та ефективне придушення сигналів у заданому частотному діапазоні.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Rothammel K. Antennas. – Vol. 2. – Berlin: DARC Verlag, 1987. – 368 p.
2. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. – 4th ed. – Wiley, 2016. – 1104 p.
3. CST Studio Suite 2023. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/> .
4. Частоти для РЕБ. Blue Bird Tech. URL: <https://www.blue-bird.tech/news/reb-chastoti-yaki-vibrati/> .
5. Orfanidis S. J. Electromagnetic Waves and Antennas. – Rutgers University, 2016. – 832 p. URL: <https://ecweb1.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/> .
6. Yagi U., Uda S. Project of a New Type of Short-Wave Beam Antenna // Proceedings of the Institute of Electrical Engineers of Japan. – 1926.
7. NanoVNA-F V3 – Vector Network Analyzer. Офіційна документація. URL: <https://nanovna.com> .
8. Constantine A. Balanis. Modern Antenna Handbook. – Wiley, 2008. – 1700 p.
9. Veselovskyi M., Tarasenko M., Chumachenko D. Design and Simulation of Yagi Antenna for UHF Communication Applications // Proceedings of the 2020 IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – Lviv, Ukraine. – 2020. – P. 450–453.

ДОДАТОК А

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Зчитування даних з Excel-файлу
df = pd.read_excel('data.xlsx')

# Отримання кутів повороту з заголовків колонок (вліво)
angles_left = [int(col) for col in df.columns[1:]]
angles_right = df.iloc[1, 1:].values.astype(float) # кути вправо з другого рядка

# Отримання gain-значень (вліво і вправо)
gains_left = df.iloc[0, 1:].values.astype(float) # перший рядок
gains_right = df.iloc[2, 1:].values.astype(float) # третій рядок

# Перетворення списку кутів у масив і формування загального масиву кутів і gain-значень
angles_left_array = np.array(angles_left)
angles_combined = np.concatenate([-angles_left_array[:-1], angles_right[1:]])
gains_combined = np.concatenate([gains_left[:-1], gains_right[1:]])

# Переведення кутів у радіани для полярної діаграми
angles_rad = np.deg2rad(angles_combined)

# Побудова полярного графіку
fig = plt.figure(figsize=(7, 7))
ax = fig.add_subplot(111, projection='polar')
ax.plot(angles_rad, gains_combined, linewidth=2)

# Налаштування вигляду діаграми
ax.set_theta_zero_location('N') # 0° зверху
ax.set_theta_direction(-1) # Обертання за годинниковою стрілкою
ax.set_rlabel_position(135) # Розміщення підписів радіуса
ax.set_title('2D діаграма спрямованості антени (за параметром S21)', va='bottom')

plt.savefig("result.png")
```