

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

« Використання гібридних методів розрахунку для моделювання
дзеркальних антен в програмі ANSYS HFSS»
(тема)

Виконав:

студент 4 курсу, групи МНТМН-21-1
Масаликін Д.І.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 – Мікро- та наносистемна
техніка _____

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна _____

(освітньо-професійна або освітньої-наукова)

Освітня програма «Мікро- та
наноелектроніка» _____

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. МБЕПП Свідерська Л.І.

канд. фіз. - мат. наук

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____

(підпис)

Бондаренко І.М.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки
Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Мікроелектроніки, електроних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 153 – Мікро- та наносистемна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Мікро- та наноелектроніка
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Масаликіну Даніїлу Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Використання гібридних методів розрахунку для моделювання дзеркальних антен в програмі ANSYS HFSS».

затверджена наказом університету від 26.05. 2025 р. № 414 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 09 06 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Дзеркальна антена діаметром до 2 м . Пакет комп'ютерного моделювання HFSS.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Дзеркальні антени .

4.2 Загальні зведення про програми HFSS.

4.3 Розрахунок та проектування дзеркальної антени в програмі HFSS.

4.4 Аналіз отриманих результатів.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Презентація 12 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів	Примітка
1.	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про моделювання дзеркальних антен	19.04.24 – 20.04.24	Виконано
2.	Проектування антен та пристроїв НВЧ	21.04.24 – 25.04.24	Виконано
3.	Виконання чисельних розрахунків	28.04.24 – 29.04.24	Виконано
4.	Аналіз розрахунків та параметрів моделювання	06.05.24– 10.05.24	Виконано
5.	Оформлення пояснювальної записки	02.06.24 – 04.06.24	Виконано
6.	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	03.06.24 – 08.06.24	Виконано

Дата видачі завдання 19.04 2025 р.

Студент _____



(підпис)

Керівник роботи _____



доц. каф. МЕЕПІ Свідерська Л.І.

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 41 стр., 24 рис, 1 табл., 9 джерел

ДЗЕРКАЛЬНІ АНТЕНИ, ANSYS HFSS, ОПРОМІНЮВАЧ, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ

Об'єкт дослідження – розрахунки дзеркальних антен. Предмет дослідження – аналіз дзеркальних антен різного діаметра та фокусу за допомогою методу інтегральних рівнянь (МІР) та методу фізичної оптики (МФО) для негофрованого та гофрованого рупора.

Мета роботи: моделювання дзеркальної антени за допомогою програмного комплексу ANSYS HFSS з використанням гібридного методу розрахунку.

У роботі наводяться результати моделювання дзеркальної антени за допомогою програмного комплексу ANSYS HFSS. Розрахунок антени діаметром до 2 м виконаний на частоті 10 ГГц з використанням гібридного методу, в якому рупорна антена-опромінювач розраховується методом кінцевих елементів, а дзеркало методом інтегральних рівнянь або методом фізичної оптики. Порівнюються результати розрахунку при опроміненні дзеркала за допомогою стандартної рупорної антени та гофрованої рупорної антени тієї ж апертури.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 41 pages, 24 figures, 1 table, 9 sources

MIRROR ANTENNAS, ANSYS HFSS, PROPAGATION, DIRECTNESS DIAGRAM

The object of investigation – is the development of mirror antennas.

The subject of the investigation – is the analysis of mirror antennas of different diameter and focus using the method of integral equations (MIE) and the method of physical optics (PO) for a non-corrugated and corrugated horn.

Purpose of the work: modeling a mirror antenna using the ANSYS HFSS software package using a hybrid calculation method.

The paper presents the results of mirror antenna modeling using the ANSYS HFSS software complex. The calculation of the antenna with a diameter of up to 2 m is performed at a frequency of 10 GHz using a hybrid method, in which the horn antenna-irradiator is calculated by the finite element method, and the mirror is calculated by the method of integral equations or the method of physical optics. The results of the calculation when the mirror is irradiated with the help of a standard horn antenna and a corrugated horn antenna of the same aperture are compared.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
.....	8
ВСТУП	9
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ВИКОРИСТАННЯ ДЗЕРКАЛЬНИХ АНТЕН ..	10
1.1 Загальні відомості про дзеркальні антени	10
1.2 Типи дзеркал	12
1.3 Особливості конструкції.....	13
1.4 Основні поняття про опромінювач антени.....	13
1.5 Методи аналізу діаграм спрямованості дзеркальних антен	15
1.5.1 Метод геометричної оптики (МГО).	15
1.5.2 Метод фізичної оптики.....	15
1.5.3 Метод фізичної теорії дифракції.	16
1.6 Застосування дзеркальних антен.....	16
2 ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДЗЕРКАЛЬНИХ АНТЕН	18
2.1 Обґрунтування вибору програми ANSYS HFSS	18
2.2 Опис програми HFSS	19
2.3 Можливості програми HFSS	20
2.3.1 Точне та достовірне моделювання складних структур.	20
2.3.2 Створення креслень тривимірних об'єктів.	21
2.3.3 Бази даних матеріалів.	21
2.3.4 Бібліотека моделей.....	21
2.3.5 Проектування антен.....	22
2.3.6 Постпроцесор поля.....	22
2.3.7 Калькулятор поля	23
2.3.8 Параметричний аналіз та оптимізація.....	24
2.3.9 Спільна платформа програми Ansoft Designer.....	24
2.4 Вибір рішення в програмі HFSS	25

3 МОДЕЛЮВАННЯ ДЗЕРКАЛЬНОЇ АНТЕНИ В СЕРЕДАВИЩІ ANSYS	28
3.1 Гібридні методи в ANSYS HFSS	29
3.2 Створення структури дзеркальної антени	30
3.3 Опромінювач дзеркальної антени	30
3.4 Установки проекту	34
3.5 Моделювання дзеркальної антени.....	36
ВИСНОВКИ.....	40
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	41
ДОДАТОК А.....	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Б	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК С.....	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АХП – антенно-хвилеводний пристрій;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ГТД - метод геометричної теорії дифракції

КСД – коефіцієнт спрямованої дії

ДЗА – дзеркальні антени

ДС – діаграма спрямованості

КВП – коефіцієнт використання поверхні

КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі;

МГО - метод геометричної оптики

МІР – метод інтегральних рівнянь

МКЕ - метод кінцевих елементів

МФО – метод фізичної оптики

НВЧ – надвисокі частоти;

ФЧХ – фазово-частотна характеристика;

ЧД – частотний діапазон.

ВСТУП

Сучасний стан техніки антен передбачає при проектуванні досить складних антенних систем використання програмних пакетів автоматизованого аналізу. Таке використання дозволяє проводити параметричну оптимізацію конструкції проектованої системи ще на етапі моделювання, уникаючи багаторазового макетування. Цей спосіб проектування вже давно знайшов собі місце у інженерній практиці. В даний час на практиці застосовується безліч пакетів тривимірного електродинамічного моделювання із застосуванням методу моментів та його модифікацій, а також кінцевих елементів. Наприклад, відомі такі пакети, як FEKO, CST Microwave Studio, ADS Momentum і т. д. Ansoft HFSS є одним із наочних пакетів, дозволяючи при цьому проводити аналіз досить складних структур із застосуванням методу кінцевих елементів.

Широко поширені в даний час у супутниковому зв'язку, РЛС та радіоастрономії дзеркальні НВЧ-антени мають розміри від десятків сантиметрів до сотень метрів. Це означає, що розміри антен можуть становити сотні довжин хвиль і більше. Отримати точне рішення таких антен, як і багатьох інших електродинамічних задач аналітичним способом можна лише в тому випадку, коли вихідна фізична проблема радикально спрощена за допомогою низки ідеалізацій. Це стосується насамперед вибору гранично простих геометричних форм тих просторових областей, де існує електромагнітне поле. Сьогодні єдиний спосіб отримати дані про такі електродинамічні системи полягає у використанні чисельних методів аналізу, що реалізуються на швидкодіючих комп'ютерах.

Для аналізу та розрахунку характеристик випромінювання дзеркальних антен великого електричного розміру в ANSYS HFSS реалізовано метод, який включає як метод кінцевих елементів, так і метод інтегральних рівнянь і фізичної оптики.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ТА ВИКОРИСТАННЯ ДЗЕРКАЛЬНИХ АНТЕН

1.1 Загальні відомості про дзеркальні антени

Дзеркальні антени – це антени, у яких для фокусування високочастотної електромагнітної енергії використовується явище дзеркального відбиття від криволінійних металевих поверхонь (дзеркал). За розмірами дзеркало значно перевищує довжину хвилі. Частіше за все типами дзеркал, що використовуються є параболоїд обертання та параболічний циліндр.

Дзеркало за своїм призначенням повинно повністю відображати падаючі на нього електромагнітні хвилі. Для цього поверхня дзеркала повинна бути виготовлена з добре провідних металів. Відбивачі виготовляються у вигляді металевих листів, які наносяться на легку діелектричну основу з пінопласту або скловолокна. У дзеркальних антен відбувається перетворення ширшої діаграми спрямованості опромінювача у вузьку діаграму спрямованості самої антени.

Кромка дзеркала та площина Z утворюють поверхню, що називається розкритом дзеркала. При цьому радіус R називається радіусом розкриття, а кут 2ψ — кутом розкриття дзеркала. В залежності від кута розкриття розрізняють тип дзеркала :

- якщо $\psi < \pi/2$ — дзеркало називають дрібним довгофокусним;
- якщо $\psi > \pi/2$ — глибоким або короткофокусним,
- якщо $\psi = \pi/2$ — середнім.

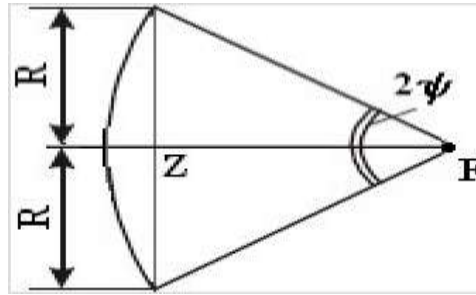


Рисунок 1.1 — Структура дзеркальної антени

Фокус опромінювача антени може розташовуватися як у фокусі дзеркала, так і не у фокусі. Якщо фокус опромінювача розташований у фокусі антени, вона називається прямофокусною. Прямофокусні антени можуть бути різних розмірів, у той час як асиметричні антени, опромінювач яких знаходиться не у фокусі дзеркала, як правило не перевищують діаметр більше 1,5 м. Такі антени називають офсетними і вони мають перевагу в тому, що у них великий коефіцієнт посилення антени. Це пояснюється відсутністю затінення розкриття дзеркала опромінювачем.

Дзеркальна антена може одночасно мати кілька опромінювачів, які можуть бути розташовані у фокальній площині антени. Опромінювачі можуть працювати в різних діапазонах хвиль або кожен одночасно в декількох діапазонах.

Дзеркальна антена формує одну вузьконаправлену сумарну, сумарно-різницеву діаграму спрямованості або кілька різноспрямованих діаграм при використанні кількох опромінювачів.

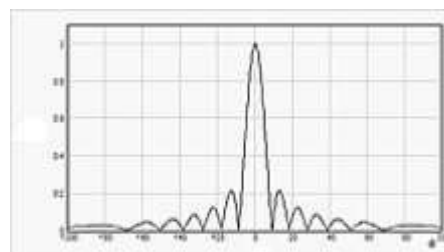


Рисунок 1.2 — Сумарно різницева діаграма параболічної антени з бічними пелюстками

1.2 Типи дзеркал

В наш час найбільшого поширення знаходять такі типи дзеркал:

- параболічні дзеркала перетворюють циліндричну чи сферичну хвилю на плоску;
- сферичні дзеркала, які мало відрізняються від параболічних дзеркал, якщо фокусна відстань дорівнює половині радіусу сфери.
- плоскі дзеркала, які більш за все використовуються в вібраторних антенах;
- дзеркала спеціального профілю.

Основна мета використання таких антен – формування діаграми спрямованості спеціальної форми.



Рисунок 1.3 — Прямофокусна параболічна дзеркальна антена



Рисунок 1.4 — Офсетні параболічні дзеркальні антени

1.3 Особливості конструкції

Дзеркало складається з діелектричної основи, яку покривають металевими листами або фольгою. При цьому листи часто є перфорованими або є сіткою, що обумовлено прагненням знизити вагу конструкції, а також максимально знизити опір вітру і опадів.

Однак таке несучільне дзеркало призводить до наступних наслідків: частина енергії проникає крізь дзеркало, що призводить до ослаблення КСД антени і посилення випромінювання за рефлектором.

1.4 Основні поняття про опромінювач антени

Як відомо [3], найбільш поширеними типами опромінювачів дзеркальних антен вважають хвилевідно-рупорні. На рис.1.5 показані ідеалізовані діаграми спрямованості опромінювачів.

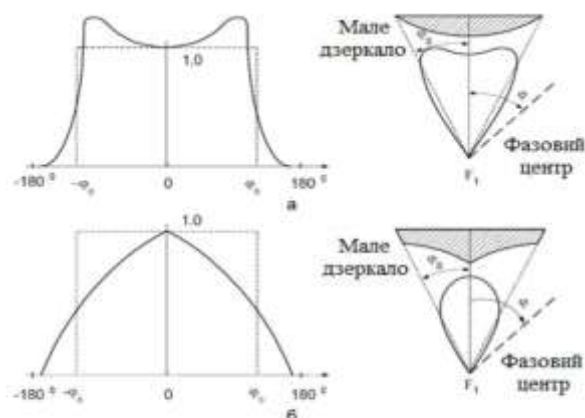


Рисунок 1.5 — Ідеалізовані діаграми спрямованості опромінювачів

Мінімальний рівень бічного випромінювання опромінювача може забезпечити мінімальний витік енергії через площину розкриття. Можна побачити наступну загальну закономірність: чим більше ширококутною є діаграма спрямованості рупора, тим оптимальнішим він буде для короткофокусних антенних систем.

Найбільше поширення отримали дзеркальні антени з пірамідальними і конічними рупорними опромінювачами.

Одним із способів забезпечення симетричної форми ДС рупорних антен є виконання стінок рупора гофрованими. У стінках рупора прорізається ряд концентричних чверть хвильових канавок з певною відстанню між ними (рис.1.6).

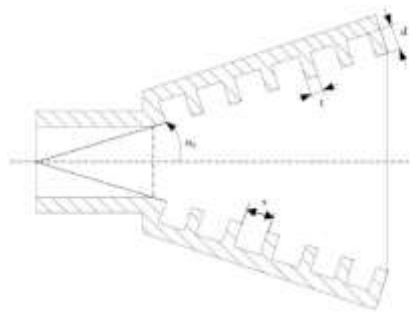


Рисунок 1.6 — Конструкція рупора з гофрованими стінками

Стінки рупора з чверть хвильовими канавками, мають дуже великий імпеданс для подовжніх поверхневих струмів провідності. Величина цих струмів різко ослабляється в порівнянні з подовжніми струмами провідності на стінках гладкого рупора тієї ж геометрії.

Різке послаблення поверхневих подовжніх струмів викликає відповідне послаблення не лише тангенціального, але і нормального полів у стінок рупора. Гофровані рупори мають кращі характеристики в порівнянні з гладкими рупорами тієї ж геометрії.

До опромінювача застосовуються такі вимоги:

- амплітудний струм опромінювача повинен забезпечувати необхідний розподіл амплітуди в отворі і мати мінімальне випромінювання поза кутом діафрагми. Енергія від опромінювача не повинна виходити за межі рефлектора;
- поперечні розміри опромінювача не повинні бути занадто великими, щоб уникнути затінення накладки;
- електрична стійкість опромінювача повинна бути достатньою для передачі повної робочої потужності радіосистеми;
- конструкція опромінювача повинна забезпечувати необхідну стійкість до змін погодних умов. Опромінювач повинен бути закритим діелектричним кожухом.

1.5 Методи аналізу діаграм спрямованості дзеркальних антен

1.5.1 Метод геометричної оптики (МГО).

Метод геометричної оптики ґрунтується на трьох законах: прямолінійного поширення світла, відбивання і заломлення світла. Метод геометричної оптики застосовується при вирішенні задач електродинаміки в грубому приближенні. Із рівняння геометричної оптики може бути отримана інформація про характер електромагнітного поля, форми ліній потоку енергії і зміни інтенсивності поля вздовж променів, але не може бути визначена абсолютна величина електромагнітного поля та її орієнтація у просторі. Вимоги використання цього методу потребують, щоб кривизна тіла і дефект падаючої хвилі мало змінювались на відстань довжини хвилі.

1.5.2 Метод фізичної оптики.

Метод фізичної оптики заснований на використанні принципів Гюйгенса-Френеля. Згідно цього закону кожна точка на поверхні, яка збуджується хвилею, може розглядатися, як джерело вторинної сферичної хвилі. Метод фізичної оптики більш точний ніж метод геометричної оптики. За допомогою методу фізичної оптики можна отримати хороші результати,

коли при переході від освітлювальної частини антени до тіневої відбувається різка відсічка струму.

1.5.3 Метод фізичної теорії дифракції.

Метод фізичної теорії дифракції полягає в тому, що разом зі струмами, які збуджуються на поверхні тіла по законам геометричної оптики є також і додаткові струми, які створюються поблизу країв і ребр, і які мають характер краєвих хвиль. В цьому методі показано, що разом із струмами існує струм і щільність поверхні струму, яка обумовлена викривленнями поверхні. Під викривленням поверхні розуміється будь яке відхилення від безкінечної площини. Метод ФТД дає велику точність в порівнянні з фізичною оптикою, яка взагалі не використовує краєві струми. В той же час різниця в результаті цих методів зменшується в результаті збільшення розмірів тіла.

1.6 Застосування дзеркальних антен

Дзеркальні антени застосовуються в різних областях, де потрібна висока спрямованість і посилення сигналу, наприклад, радіолокації, супутникового зв'язку, радіозв'язку і астрономічних спостереженнях. Їхня головна перевага – здатність формувати вузький промінь випромінювання, що дозволяє ефективно передавати та приймати сигнали на великі відстані.

Застосування дзеркальних антен:

- радіолокація: дзеркальні антени використовуються в системах радіолокації для виявлення і відстеження об'єктів, наприклад, літаків, кораблів і ракет;
- супутниковий зв'язок: вони відіграють важливу роль у супутниковому зв'язку, забезпечуючи зв'язок між супутниками та земними станціями;
- радіозв'язок: дзеркальні антени застосовуються в радіорелейному зв'язку, передаючи сигнали між віддаленими містами та бездротового зв'язку для передачі даних;
- астрономія: в астрономії використовуються великі дзеркальні антени для вивчення небесних тіл та отримання зображень віддалених галактик;

- інші області - дзеркальні антени також застосовуються в мікрохвильовому зв'язку, системах бездротового зв'язку, а також в побутових пристроях, таких як супутникові телевізійні приймачі.

Переваги дзеркальних антен:

- висока спрямованість: дзеркальні антени забезпечують вузький промінь випромінювання, що дозволяє ефективно передавати сигнали потрібному напрямку;
- велике посилення: вони можуть досягати значного посилення сигналу, що важливо для прийому та передачі слабких сигналів;
- простота конструкції: дзеркальні антени відносно прості у виготовленні та обслуговуванні;
- низька вартість - у порівнянні з іншими типами антен, дзеркальні антени можуть бути економічними.

Різновиди дзеркальних антен:

- параболічні антени - це найпоширеніший тип дзеркальних антен, що використовує параболічний рефлектор для фокусування сигналу;
- рупорно-дзеркальні антени: поєднують у собі параболічний рефлектор та рупорний опромінювач для додаткового фокусування та посилення сигналу;
- фокусні дзеркала: використовуються для фокусування сигналу на опромінювач.

В цілому, дзеркальні антени є незамінним інструментом у різних галузях зв'язку, радіолокації та астрономії, забезпечуючи високу ефективність та надійність передачі та прийому сигналів.

Для проектування та аналізу дзеркальної антени в наш час можна використовувати різні програми, які надають можливість створити модель, встановити параметри моделювання, налаштувати середовище. Однією з таких програм є програма Ansys HFSS, яка має переваги серед інших програм і робота з якої буде розглянута в другій главі.

2 ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДЗЕРКАЛЬНИХ АНТЕН

При розрахунку дзеркальних антен отримати точне рішення можна лише в тому випадку, коли вихідна фізична проблема радикально спрощена за допомогою низки ідеалізацій. Це стосується насамперед вибору гранично простих геометричних форм тих просторових областей, де існує електромагнітне поле. Сьогодні єдиний спосіб отримати дані про такі електродинамічні системи полягає у використанні чисельних методів аналізу, що реалізуються на швидкодіючих комп'ютерах. На перших етапах проектування виникає проблема вибору методу та реалізації програми для найбільш ефективного вирішення конкретного завдання.

2.1 Обґрунтування вибору програми ANSYS HFSS

Для аналізу та розрахунку характеристик випромінювання дзеркальних антен великого електричного розміру значну популярність здобула програма High Frequency System Simulator (HFSS) компанії AnSoft. Ця програма призначена для аналізу тривимірних НВЧ структур, у тому числі антен і невзаємних пристроїв. В останній час компанія AnSoft зробила значний крок уперед. З'явилися нові можливості, серед яких можна відзначити:

- періодичні граничні умови, призначені для аналізу антенних решіток;
- підпрограму аналізу власних коливань та власних хвиль ;
- можливості візуалізації результатів аналізу, такі, як анімації картин поля, побудова тривимірних діаграм спрямованості;
- адаптивний алгоритм розв'язання електродинамічних завдань, що забезпечує високу ефективність моделювання складних структур;
- можливість аналізу багатополосників із багатомодовими портами;
- великі бази даних по НВЧ матеріалам та НВЧ компонентам;

Програма ANSYS_HFSS першою із комерційних програм показала на повну силу широкі можливості електродинамічного моделювання.

2.2 Опис програми HFSS

В основі програми HFSS лежить використання методу кінцевих елементів, методу моментів та гібридних методів розрахунку. Основні етапи моделювання наведено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 — Алгоритм створювання проекту в HFSS

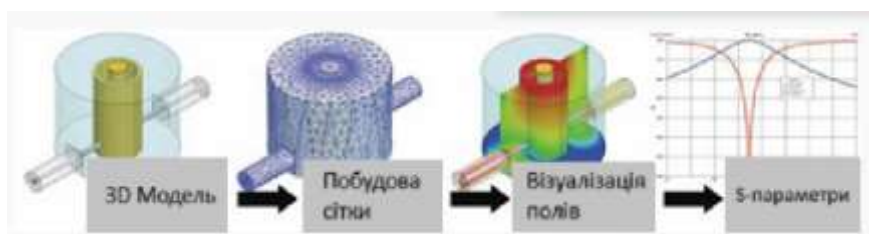


Рисунок 2.2 — Етапи роботи в HFSS

В процесі проектування за допомогою HFSS користувачеві необхідно виконати такі дії;

а) створення моделі аналізованої структури:

- створення тривимірної графічної моделі структури;
- завдання параметрів матеріалів, з яких складається структура.

б) визначення електродинамічних параметрів структури:

- завдання граничних умов на поверхнях, що формують аналізований об'єкт;
- визначення та калібрування портів;
- завдання параметрів рішення.

в) електродинамічний аналіз об'єкта:

- аналіз об'єкта у смузі частот;
- параметричний аналіз об'єкта;
- параметрична оптимізація об'єкта.

г) візуалізація результатів електродинамічного аналізу:

- побудову графіків у декартових, полярних координатах, діаграм Сміта, діаграм спрямованості тощо;
- анімація розподілів електромагнітного поля та електричного струму;
- збереження результатів аналізу у файлах даних.

2.3 Можливості програми HFSS

Для того, щоб отримати більш повне уявлення про можливості HFSS, розглянемо докладніше ряд найважливіших особливостей цієї програми.

2.3.1 Точне та достовірне моделювання складних структур.

HFSS включає ряд підпрограм, що реалізують різні функції, одна з яких називається вирішальним пристроєм. Ця підпрограма забезпечує отримання достовірних та точних результатів.

Потужним засобом підвищення точності рішення є метод формування сітки, який полягає у наступному: початкове розбиття простору на тетрадральні осередки створюється за допомогою базових елементів, наявних у бібліотеці

HFSS. Це початкове розбиття на комірки надає грубу інформацію про поле, виділяючи області з високою напруженістю або великими градієнтами. Розбиття на комірки потім ущільнюється тільки там, де поле зазнає різкої зміни. Це зменшує обчислювальні витрати при поліпшенні точності рішення.

2.3.2 Створення креслень тривимірних об'єктів.

Першим кроком при роботі з програмою HFSS є створення тривимірної графічної моделі структури.

В програмі існує блок креслення моделей, який сумісний із програмою AutoCAD. Він виконує такі операції:

- багаторазове об'єднання об'єктів, віднімання та перетин їх;
- динамічне обертання об'єктів;
- виділення/приховування об'єктів;
- зсув 2D та 3D об'єктів у просторі та створення 3D об'єктів з 2D об'єктів;
- параметризація об'єктів для оптимізації форми за заданим критерієм;
- необмежені undo/redo та інші операції.

2.3.3 Бази даних матеріалів.

База даних HFSS включає широкий спектр матеріалів з різними діелектричними проникністю, магнітною проникністю тощо. Користувачі можуть використовувати однорідні, неоднорідні, анізотропні, провідні, резистивні та напівпровідникові матеріали. Програма містить також можливість моделювання феритів для невзаємних приладів.

2.3.4 Бібліотека моделей.

Програма HFSS включає велику бібліотеку стандартних структур, такі як:

- мікросмужкове T розгалуження;
- зрізані та незрізані повороти мікросмужкових ліній;
- радіальні та несиметричні вигини ліній;
- коаксіальні лінії;
- кругла та квадратна 3D спіраль;
- магічний T-міст;
- плоскі антени;

- спіральні зміни та інше.

2.3.5 Проектування антен.

Програма HFSS обчислює основні характеристики антен, у тому числі коефіцієнт посилення, тривимірні діаграми спрямованості (ДС) у дальній зоні, спрямованість антени, посилення, коефіцієнт еліптичності тощо. На рис. 2.3 показано вікно, яке дозволяє побачити тривимірну діаграму спрямованості антени.

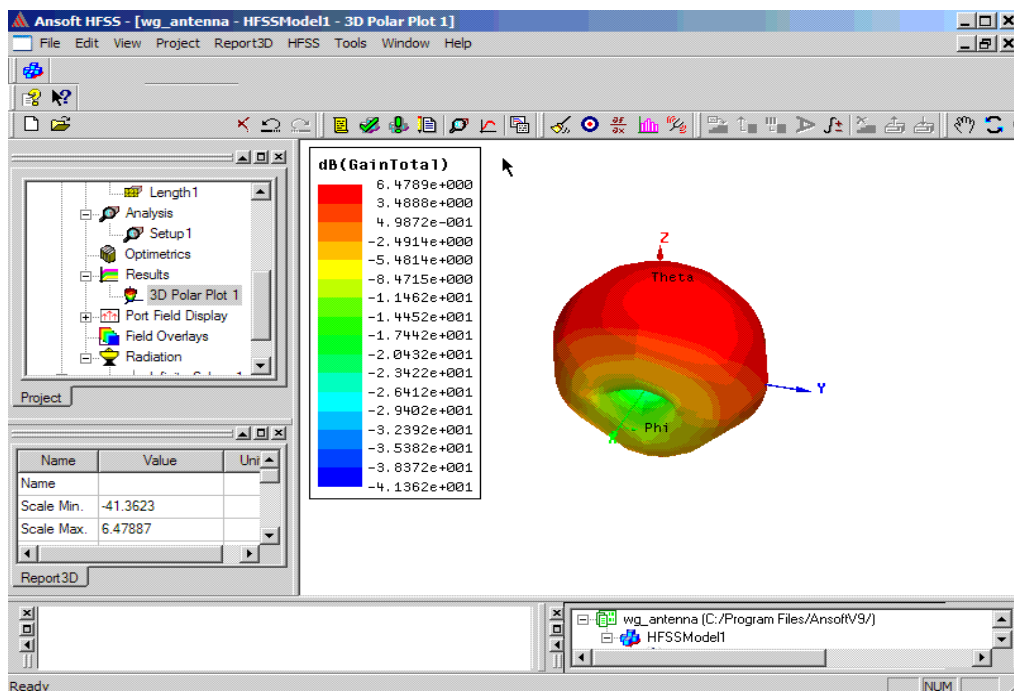


Рисунок 2.3 — Вікно програми HFSS

2.3.6 Постпроцесор поля.

За допомогою постпроцесора програма HFSS може:

- забезпечити анімацію для будь-якого поля та його візуалізацію у вигляді векторів, контурів або заштрихованих контурів;
- обробляти статичні та анімаційні креслення на будь-якій поверхні;
- виконувати анімацію векторів поля, скалярного поля або будь-якої заданої величини, пов'язаної з полем, використовуючи постпроцесорну обробку даних розрахунку (рис. 2.4).

Постпроцесор також виконує обробку даних після розрахунку поля. З його допомогою можна обчислити такі характеристики як потужність розсіювання, поглинена енергія, добротність, S-параметри та пов'язані з ними характеристики. Також можна розрахувати абсолютні значення полів. Тобто, у кожній точці простору можна вивести модуль та фазу векторів E та H електромагнітного поля.

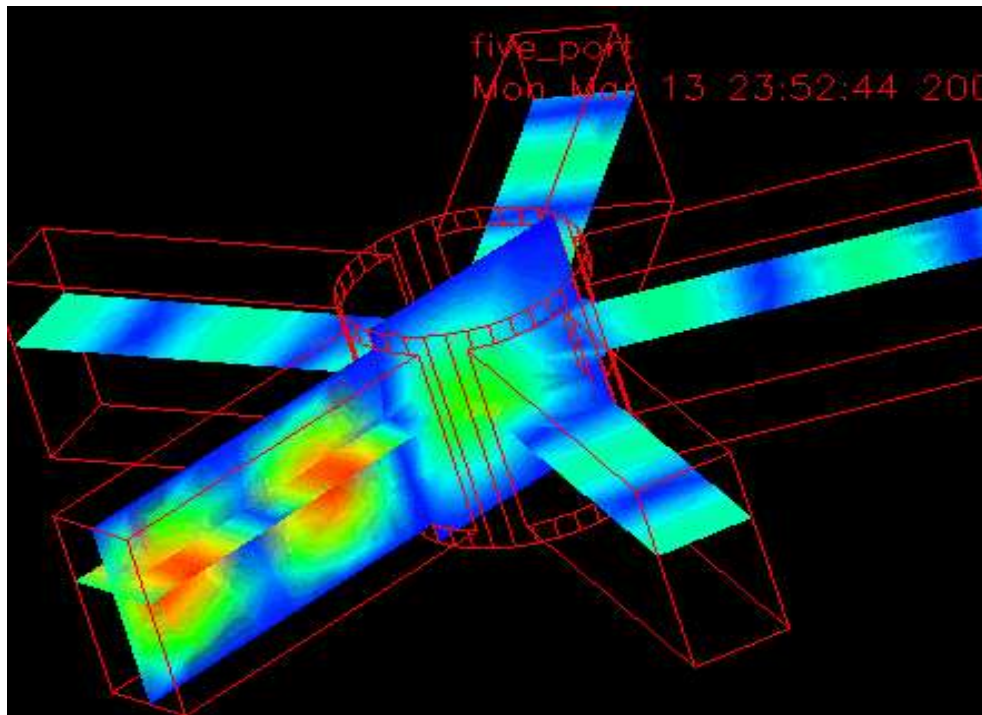


Рисунок 2.4 — Вікно програми HFSS

HFSS дає можливість провести аналіз поля у різних перерізах, а також анімацію розподілу поля за рахунок зміни фази збуджуючого генератора, що створює враження проходження поля через структуру. Цю анімовану картину можна використовувати для оптимізації структури та аналізу якості конструкції.

2.3.7 Калькулятор поля .

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

2.3.8 Параметричний аналіз та оптимізація.

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

Як цільову функцію при оптимізації можуть використовуватися як окремі S-параметри, так і інші характеристики, включаючи діаграму спрямованості та параметри антени. Використовуючи розширені макрокоманди, можна швидко зробити десятки розрахунків, щоб зрозуміти, які параметри сильніше впливають на ширину променя антени, коефіцієнт підсилення та рівень бічних пелюсток.

2.3.9 Спільна платформа програми Ansoft Designer.

Система Ansoft Designer – це програма для проектування електронних схем та радіосистем різного призначення.

В Ansoft Designer реалізована нова функція Solver on Demand, яка призначена для зв'язку між інтерфейсом Ansoft Designer і програмою Ansoft HFSS. Ansoft Designer інтегрує в одному інтерфейсі аналіз на всіх рівнях: електромагнітному, схемному та системному (рис.2.5).

Інтерфейс Ansoft Designer дозволяє викликати відразу в цьому ж вікні і кілька інших важливих утиліт: Nexxim (косимуляція на системному рівні), і Q3D Extractor (виділення даних з урахуванням статистичного розподілу).

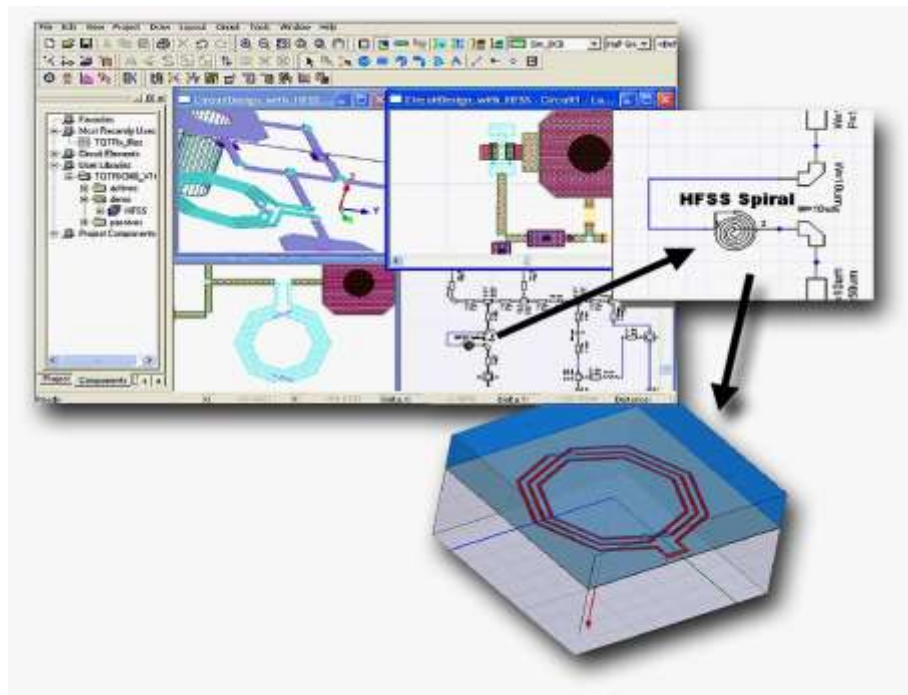


Рисунок 2.5 — Багатовіконний інтерфейс Ansoft Designer

2.4 Вибір рішення в програмі HFSS

При роботі з програмою HFSS залежно від завдання можна вибрати кілька режимів:

- Driven Modal для обчислення S-параметрів пасивних пристроїв, наприклад, мікросмужкових ліній, хвилеводи, що працюють у багатомодовому режимі;
- Driven Terminal для обчислення S-параметрів багатополюсників, до яких підключено навантаження;
- Eigenmode для розрахунку власних хвиль/коливань структури;
- Transient для електромагнітного розрахунку перехідних процесів методом Галеркіна (DGTD);
- модуль HFSS-IE (IE – інтегральні рівняння) виконує обчислення струмів на провідних та діелектричних поверхнях на межі вільного простору із застосуванням методу моментів;
- гібридний метод кінцевих елементів та інтегральних рівнянь (FE-BI) дозволяє працювати зі складною геометрією (метод кінцевих елементів) та на етапі

складання накладати на рішення граничні умови та умови випромінювання (метод інтегральних рівнянь).

Основні конфігурації методів пакета ANSYS HFSS :

- ANSYS HFSS Frequency використовується «для розрахунку проектів у частотній області методом кінцевих елементів (FEM, Finite Element Method). В результаті застосування даного методу можливий розрахунок S-, Y-, Z- параметрів, побудова розподілу полів у ближній та дальній зонах, розрахунок діаграми спрямованості антенних систем;
- ANSYS HFSS Transient використовується для розрахунку проектів у часовій області на основі дискретного методу Галеркіна (DGTD, Discontinuous Galerkin Time Domain), дозволяючи аналізувати завдання за імпульсних джерел збудження;
- ANSYS HFSS-IE Solver дозволяє виконувати розрахунок на основі методу моментів (MoM), крім того, є можливість використання методу фізичної оптики (Physical Optics) для аналізу характеристик об'єктів великих електричних розмірів (літаки, кораблі, антенні решітки, дзеркальні антени);
- ANSYS HFSS FE-BI Solver – гібридний метод, який поєднує як метод інтегральних рівнянь, так і метод кінцевих елементів;
- ANSYS HFSS Planar EM орієнтований на проектування НВЧ інтегральних схем, монолітних та гібридних мікрохвильових інтегральних схем, систем на кристалі, бездротових систем зв'язку та інших ВЧ- та НВЧ-пристроїв;
- Antenna Design Kit (ADK) – це бібліотека, що містить велику кількість готових шаблонів різних типів антен: спіральних, рупорних, дипольних, смужкових, які можуть використовуватися в основному проекті ANSYS HFSS для тривимірного аналізу та оптимізації.

Метод декомпозиції доменів (Domain Decomposition Method, DDM) дозволяє проводити чисельне моделювання великих моделей, використовуючи пам'ять кількох комп'ютерів. Метод DDM автоматично розбиває сітку кінцевих елементів на безліч менших підсіток (доменів) і визначає оптимальну кількість таких доменів залежно від розміру сітки, кількості комп'ютерів та

застосовуваних процесорів. Домени аналізуються незалежно, потім за допомогою ітераційної процедури доменних інтерфейсів реконструюється повне рішення. Такий доступ до мережної пам'яті дозволяє виконувати чисельне моделювання великих моделей, для яких може не вистачити пам'яті окремого комп'ютера, а також зменшує час на моделювання.

Таким чином, в даний час ANSYS HFSS є одним з визнаних лідерів для моделювання високочастотних електромагнітних полів, забезпечуючи точність, багатопроцесорні обчислення, різні типи вирішувачів, включаючи гібридні та високочастотні методи, розширюючи клас розв'язуваних завдань.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ДЗЕРКАЛЬНОЇ АНТЕНИ В СЕРЕДАВИЩІ ANSYS

Раніше було показано, що програма HFSS виконує розрахунки методом кінцевих елементів частотної області, розрахунок перехідних процесів методом Галеркіна, використовує метод інтегральних рівнянь, метод фізичної оптики, і навіть гібридне використання всіх реалізованих методів розрахунку.

Будь який метод в HFSS реалізований у вигляді програми, в якій потрібно створити досліджувану структуру, задати параметри матеріалів і характеристики, що розраховуються. Після цього HFSS генерує сітку, яка адаптивно ущільнюється залежно від особливостей структури та поля у ній.

Відомо, що дзеркальні НВЧ-антени мають розміри від десятків сантиметрів до сотень метрів [5]. Це означає, що розміри антен можуть становити сотні довжин хвиль і більше. Розрахунок таких великих структур строгими електродинамічними методами вимагає великих обчислювальних витрат. Для аналізу та розрахунку характеристик випромінювання дзеркальних антен великого електричного розміру в ANSYS HFSS реалізовано наближені методи, до яких належать метод фізичної оптики [2–3].

Метод фізичної оптики використовує як ключовий алгоритм чисельного розрахунку формулу:

$$J^e = 2[\bar{H}, \bar{n}], \quad (3.1)$$

де J^e [А/м] – поверхневий електричний струм на металевому рефлекторі;

H [А/м] – вектор магнітного поля, створюваного у цій точці первинним опромінювачем;

n – вектор нормалі кожної точки поверхні рефлектора.

Розраховані за формулою (3.1) електричні струми використовуються для визначення поля випромінювання дзеркальної антени. Розрахунок вторинного поля зводиться до обчислення відповідних двовимірних інтегралів Фур'є від поверхневого електричного струму.

Таким чином, у методі фізичної оптики немає необхідності вирішувати систему лінійних рівнянь алгебри високого порядку, до чого зводиться більшість електродинамічних методів вирішення системи рівнянь Максвелла.

3.1 Гібридні методи в ANSYS HFSS

Першим методом електродинамічного моделювання, реалізованого HFSS, був метод кінцевих елементів (FEM, Finite Element Method). Цей метод довів свою точність і надійність при моделюванні та оптимізації коаксіально-хвильових переходів, фільтрів, планарних антен, розміри яких не перевищують п'яти довжин хвиль. Однак при аналізі об'єктів з великими розмірами вимоги до комп'ютера (обсяг оперативної пам'яті та швидкодія) значно зростають. На допомогу прийшли реалізовані у версії HFSS гібридні методи моделювання, коли різні частини завдання можна вирішувати різними методами:

- метод FEM – метод кінцевих елементів: обидві антени (дзеркало та опромінювач) знаходяться в одному боксі, описаному як Radiate;
- метод IE – гібридний метод, коли на великий об'єкт падає хвиля, еквівалентна далекому полю опромінення і розрахунок ведеться методами IE;
- метод FBIE – кожна антена охоплюється окремими боксами, усередині яких простір вважається методом FEM, а ці бокси покриваються граничними умовами IE;
- метод IE-PO – метод фізичної оптики PO, поєднаний із методом інтегральних рівнянь.

У даній роботі вирішувалося завдання опромінення параболічного дзеркала та проводилося порівняння результатів розрахунку двома методами: методом інтегральних рівнянь та методом фізичної оптики. Для антени однієї складності рішення виконувалося на одній і тій самій сітці. Розрахунки виконували на частоті 10 ГГц. Як опромінювач використовувалися круглі рупорні антени двох типів:

- а) з гладкими стінками розкриття;

б) з гофрованими стінками розкриття.

3.2 Створення структури дзеркальної антени

Перетин параболічного дзеркала вздовж осі x будується за допомогою функціональної залежності

$$Z(x) = F_{oc} - \frac{1}{4FOC} (x \times x), \quad (3.2)$$

де F_{oc} – фокусна відстань параболи, що зв'язується з діаметром параболічного дзеркала D співвідношенням F_{oc}/D . За цими даними визначаються характеристики дзеркальної антени, що опромінюється рупорною антеною: коефіцієнт спрямованої дії (КСД) та коефіцієнт використання поверхні (КВП), які пов'язані між собою наступним співвідношенням [6]:

$$КСД = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \times КВП, \quad (3.3)$$

Для заданої геометрії дзеркала завдання вирішувалося двома методами: методом інтегральних рівнянь та методом фізичної оптики.

Проект аналізу опромінювача вирішувався методом кінцевих елементів FEM і створювався як дизайн HFSS. Характеристики далекого поля опромінювача надходили у проект дзеркальної антени у точці фокуса.

3.3 Опромінювач дзеркальної антени

Опромінювачем служила кругла рупорна антена з розмірами, показаними на рис.3.1 (стандартний рупор) та рис. 3.2 (гофрований рупор).

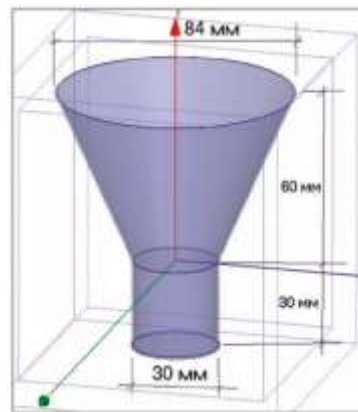


Рисунок 3.1 — Круглий рупор

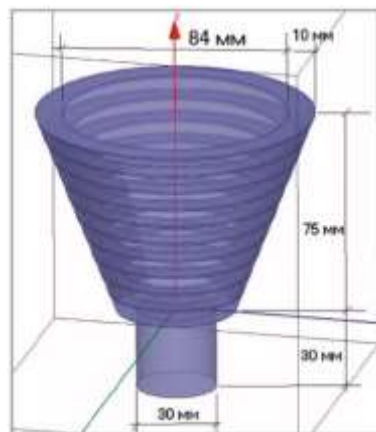


Рисунок 3. 2 — Круглий гофрований рупор

Порт ставиться на перетин хвилеводу. Розраховані в HFSS методом FEM діаграми спрямованості опромінювачів показано рис.3.3.

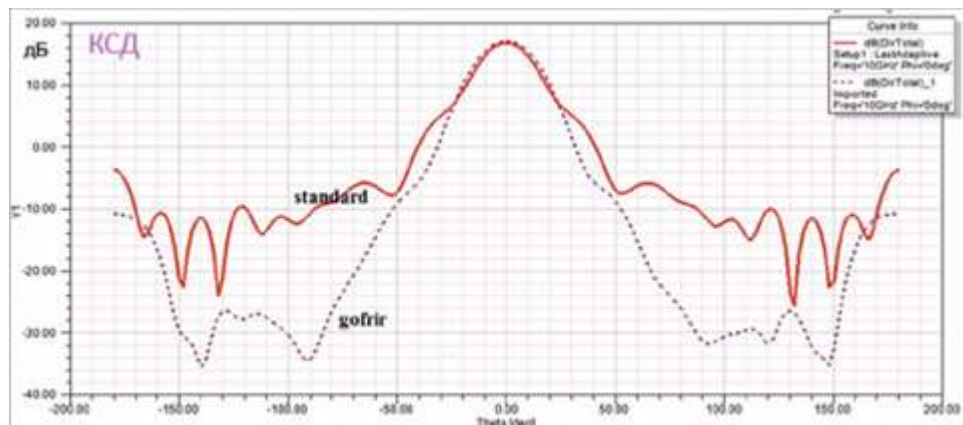


Рисунок 3. 3 — Діаграма спрямованості стандартного та гофрованого опромінювачів

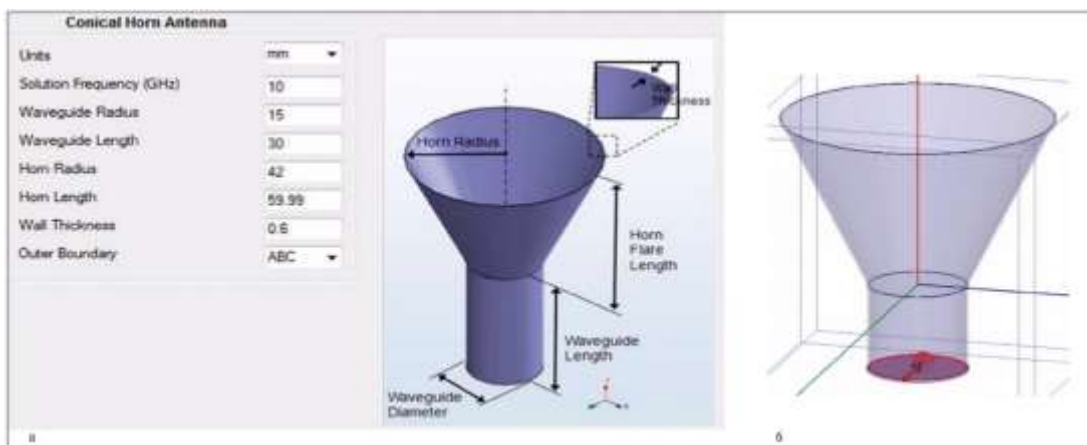
Діаметр (а також площа розкриття) розраховувалася по кутку падіння на дзеркало. Довжина розкриття вибиралася виходячи з допустимого спотворення поверхні рівної фази.

При моделюванні дзеркальної антени можна використовувати зв'язок із дзеркалом як по ближньому, так і далекому полю. Для малих дзеркал потрібно створювати зв'язок ближнього поля, а для великих дзеркал рекомендується створювати зв'язок по далекому полю.

Як видно з рис. 3.3, рівень бічних пелюсток у гофрованої антени менший, ніж у стандартної. Це призводить до збільшення КСД гофрованої антени порівняно зі стандартною.

Для спільного моделювання в HFSS окремих частин проекту різними методами (опромінювач – методом FEM, дзеркало – методом інтегральних рівнянь чи методом фізичної оптики) використовувався гібридний метод. В одному проекті вважалися два дизайни: дизайн HFSS та дизайн IE.

Опромінювач у вигляді круглого рупора (рис. 3.4) можна створити за допомогою спеціальної утиліти ADK HFSS, що додається до HFSS.



а – опромінювач дзеркальної антени як круглого рупора в інтерфейсі утиліти ADK HFSS;

б - порт, що встановлюється в перерізі круглого хвильоводу

Рисунок 3. 4 — Конструювання опромінювача

Розраховані у проекті характеристики далекого поля викликаються у іншому проекті як джерело випромінювання.

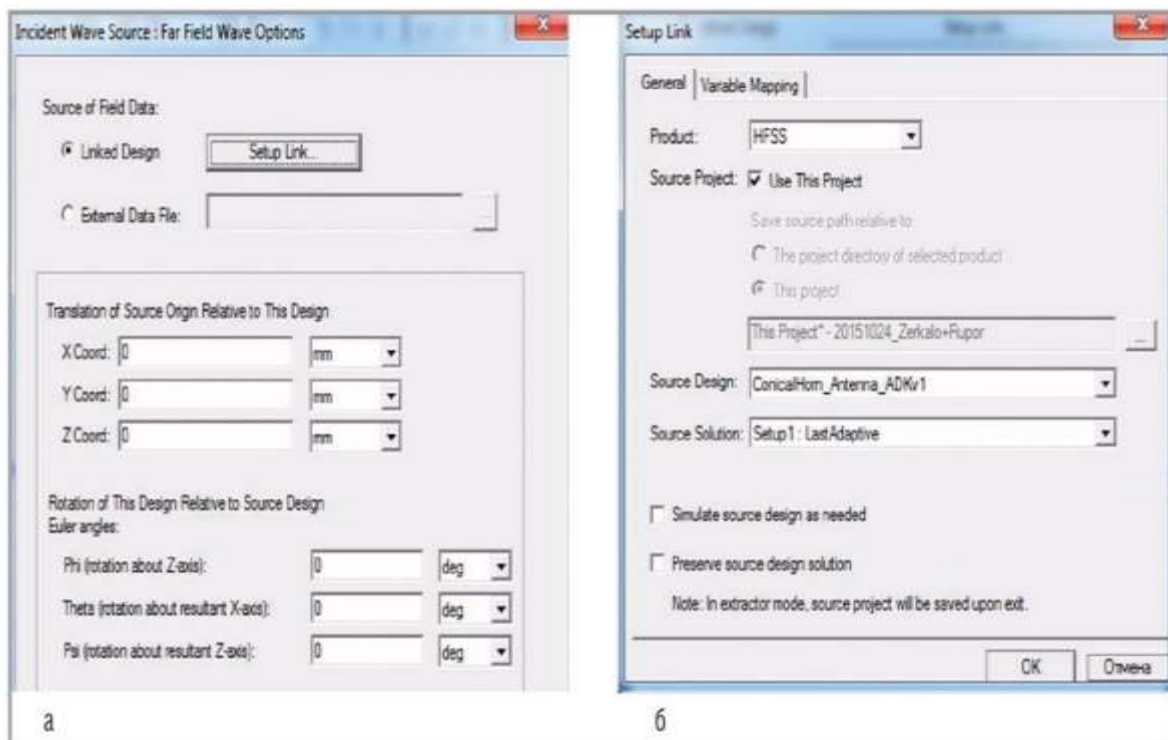
Створювалось у спільному проекті ще один дизайн типу ІЕ. Було побудовано в цьому дизайні дзеркало розміром 2λ , для чого вибиралось значення $F_{oc} = 2,4$ см. В результаті, враховуючи обране співвідношення $F_{oc} / D = 0,4$, отримували $D = 6$ см. Це найменший розмір дзеркала, що моделюється (таблиця 2.1, номер розрахунку 1).

Таблиця 2.1 — Результати розрахунку дзеркальних антен різного діаметра (D) та фокусу (F) за допомогою методу інтегральних рівнянь (ІЕ) та методу фізичної оптики (РО) для негофрованого (ST) та гофрованого (GF) рупора

№ розрахунку	Діаметр дзеркала	D, см	F, см	КСД дзеркальної антени, дБ	Рівень бокових пелюстків дзеркальної антени, дБ	Час розрахунку, кількість трикутників розбиття дзеркала
1	2λ	6	2.4	9,39 (ST-ІЕ) 7,78 (ST-РО) 6,05 (GF-ІЕ) 3,06 (GF-РО)	-6,93 (ST-ІЕ) -5,58 (ST-РО) -9,16 (GF-ІЕ) 2,57 (GF-РО)	0,1(570) 0,05(478) 3,1 (570) 0,06(478)
2	10λ	30	12	23,39 (ST-ІЕ) 23,21 (ST-РО) 19,99 (GF-ІЕ) 20,09 (GF-РО)	-7,59 (ST-ІЕ) -10,35 (ST-РО) -30,98 (GF-ІЕ) -24,48 (GF-РО)	1.21(8130) 0,09(6400) 6,58(8131) 011(6400)
3	30λ	90	36	33,86 (ST-ІЕ) 33,78 (ST-РО) 31,14 (GF-ІЕ) 31,14 (GF-РО)	-9,52 (ST-ІЕ) 9,52 (ST-РО) -2,56 (GF-ІЕ) -2,56 (GF-РО)	91(79879) 0,2(62862) 80(79874) 0,2(62892)
4	67λ	200	80	40,32 (ST-РО) 39,67 (GF-РО)	4,89 (ST-РО) 4,89 (GF-РО)	90(290480) 103(290480)

3.4 Установки проекту

У цьому ж проекті вибиралось джерело збудження як хвилю, що падає, в дальній зоні і вибирался (кнопкою Setup Link) проект з рупором (рис. 3.5). У цьому діалозі можна скоригувати положення фазового центру опромінювача щодо фокусу дзеркала і кут зміщення рупора.



а – встановлення зв'язку між проектами опромінювача та проектом із дзеркалом; б - вибір проекту опромінювача у вигляді конічної антени

Рисунок 3. 5 — Установки проекту

Проекти рупорної та дзеркальної антен зв'язуються по далекому або ближньому полю (рис.3.6). Перший випадок дає точніші результати для дзеркала великого розміру.

Діаграму спрямованості (ДС) опромінювача, розраховану методом ІЕ, можна також експортувати та запам'ятати у вигляді файлу з розширенням .ffd. У проекті HFSS-ІЕ метод ІЕ вибирається за замовчуванням (рис. 3.6).



Рисунок 3. 6 - Переведення розрахунку методом ІЕ до розрахунку методом фізичної оптики

Щоб вивести один графік перерізу ДС, отримані методом ІЕ і РО, можна після розрахунку методом ІЕ створити окрему папку й у неї перенести отримані дані, а після розрахунку методом РО перенести в цей графік дані, розраховані методом РО.

Метод фізичної оптики МРО вибирається в діалозі установки рішення, активізуючи опцію Use Advanced Options (рис.3.6) і далі – Use PO Solver. Включення опції Do Lambda Refinement означає, що використовувався метод адаптивного аналізу за критерієм ущільнення за довжиною хвилі.

Опцію рішення методом інтегральних рівнянь можна вибрати як АСА (Adaptive Cross Approximation) або як MLFMM (Multipole Fast Method), причому останній метод ефективніший для великих розмірів аналізованої моделі, ніж метод АСА. Опція Lambda Target (рис.3.6) встановлює параметри навколишнього матеріалу.

3.5 Моделювання дзеркальної антени

Дзеркальна антена у вигляді тривимірного параболоїда діаметром $D=30\lambda=90$ см має фокусну відстань $F=36$ см (рис. 3.7).

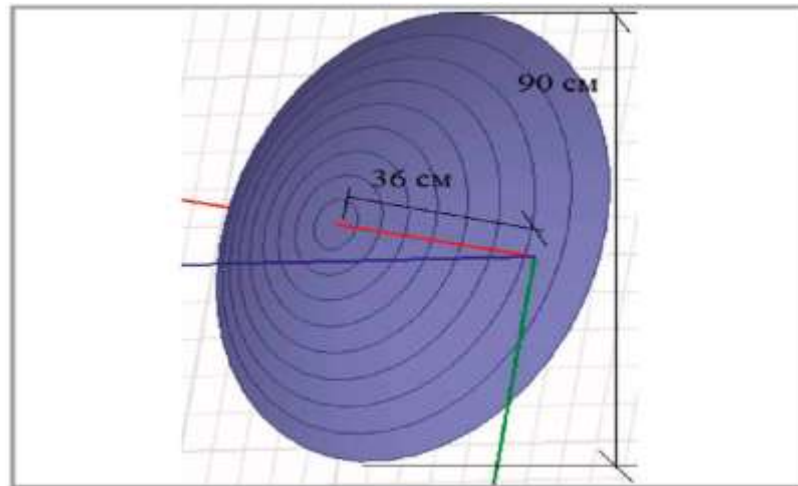


Рисунок 3.7 — Геометрія дзеркала антени діаметром 90 см

Ця антена створювалася в проєкті HFSS-IE і в ньому можна розрахувати струми, що йдуть поверхнею дзеркала (рис. 3.8)

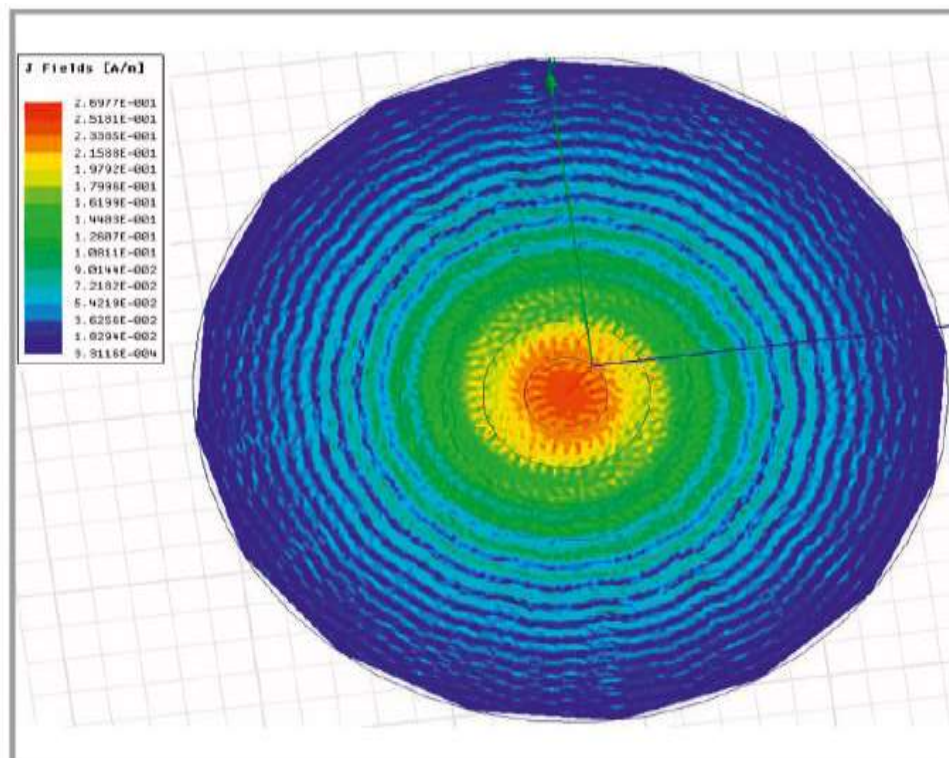


Рисунок 3.8 — Струм на поверхні дзеркала

Розрахунок дзеркальної антени при збудженні негофрованим рупором робить КСД:

- за формулою (3.3), рівним 34,5 дБ (2826 од.)
- методом РО (рис.3.9), рівним 33,9 дБ (2450 од.).

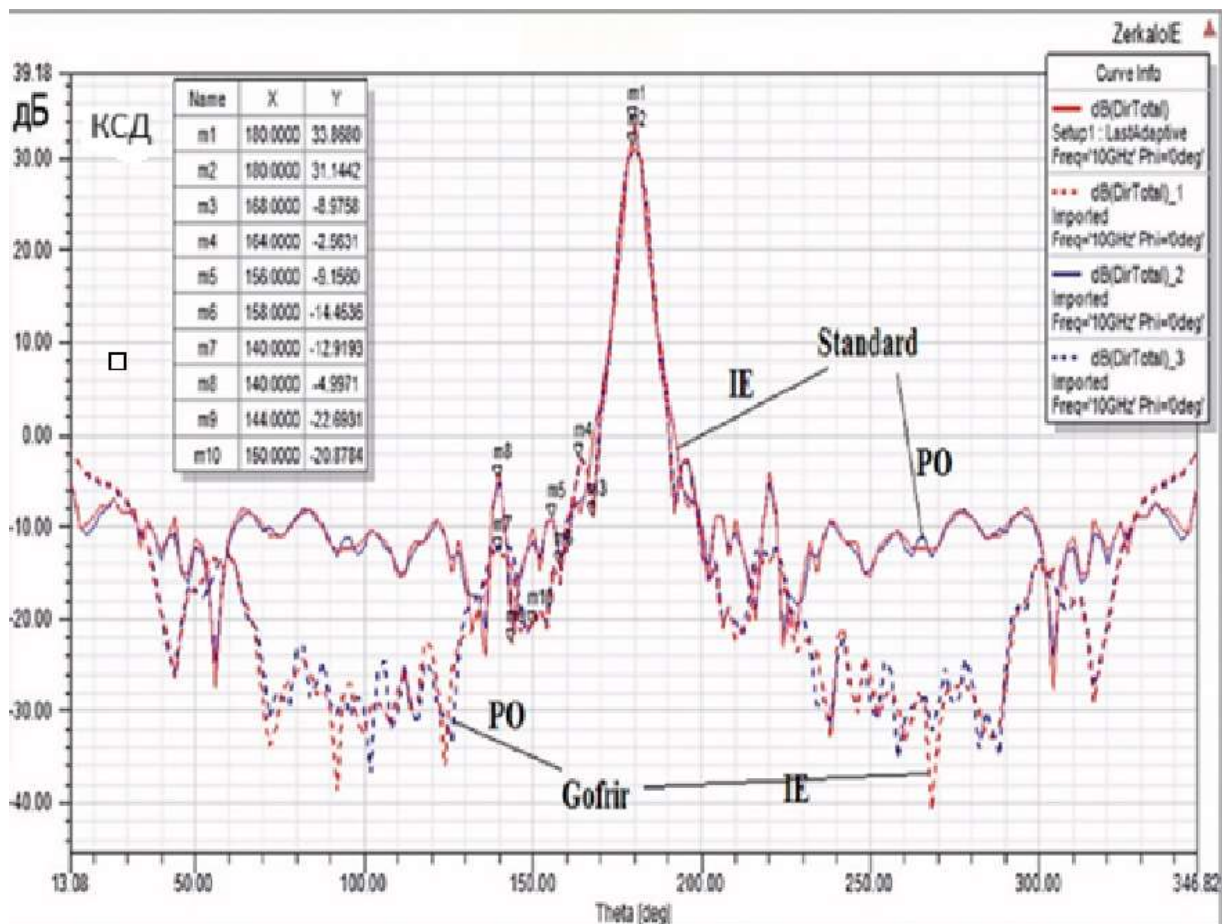


Рисунок 3.9. — Перетин діаграми спрямованості для двох кутів та двох методів розрахунку та діаметра $D = 30$ (90 см)

Враховуючи різницю, отриману в цих розрахунках, можна зробити висновок, що коефіцієнт використання поверхні, наведений у формулі (3.3), дорівнює 0,87.

Розрахунки параметрів дзеркальних антен, отримані різними способами, зведені на один графік (рис. 3.9).

Застосування як опромінювач стандартного рупора дає КСД дзеркальної антени рівний 31,14 дБ (рис. 3.10), а у разі застосування гофрованого рупора КСД

= 33,78 дБ (рис. 3.11). Виграш становив понад 2 дБ. З рис. 3.9 також видно, що середній рівень бічних пелюсток щодо рівня головної пелюстки для випадку гофрованого рупора знижений приблизно до -50 дБ, а для негофрованого рупора - до -40 дБ. Але це лише кількісна оцінка, оскільки модель не враховує елементів затінення, які принципово існують у реальній антені.

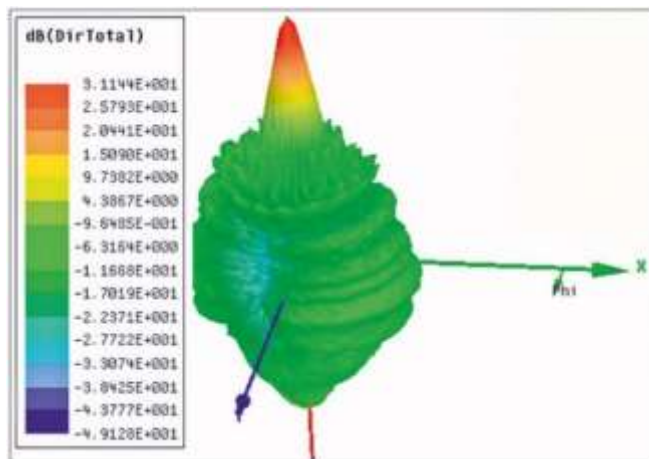


Рисунок 3.10 — ДС дзеркальної антени, що опромінюється стандартним рупором

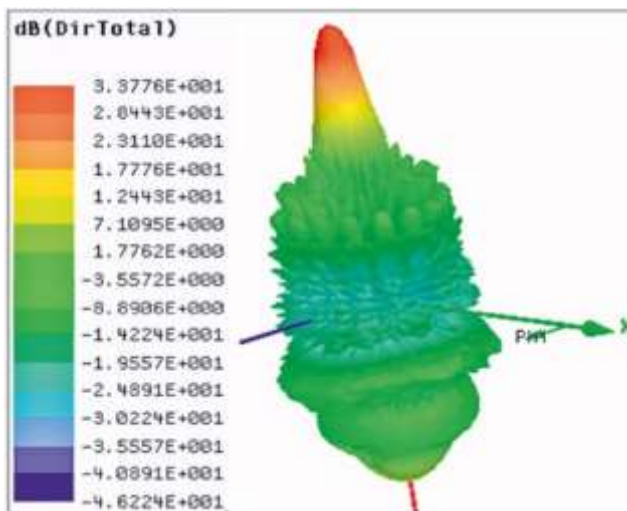


Рисунок 3.11 — ДС дзеркальної антени, що опромінюється гофрованим рупором

Результати розрахунку для декількох розмірів дзеркала (кожен для випадку $F/D = 0,4$) зведені в таблицю 2.1 [8]. Для порівняння наведені необхідні ресурси: час рахунку і кількість трикутників, на які розбивається поверхня дзеркальної антени. Останній рядок в таблиці 2.1 відноситься до розрахунку процесором Intel Core i7-3770 та пам'яттю об'ємом 16 Гбайт методом фізичної оптики за 103 секунди наведена на рис. 3.12

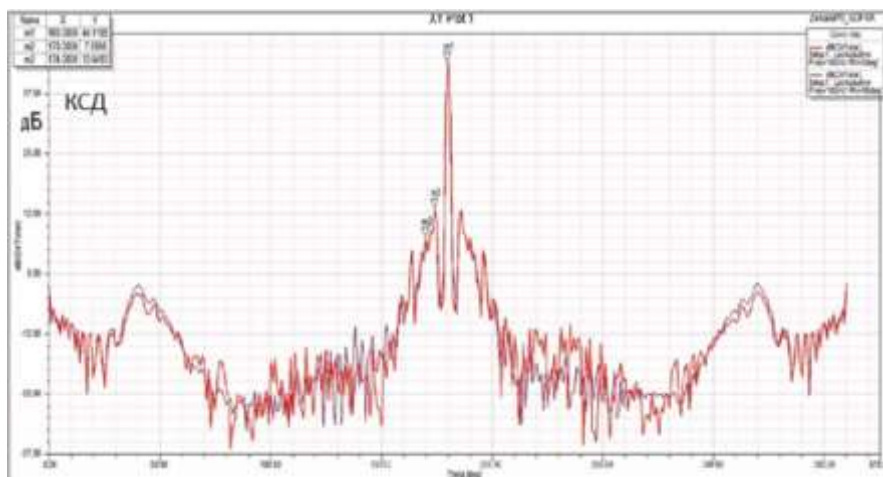


Рисунок 3.12 — ДС дзеркальної антени діаметром 2 м, що опромінюється гофрованим рупором

Таким чином, гібридні методи, реалізовані в пакеті ANSYS HFSS, дозволяють використовувати цю програму для розрахунку великих дзеркальних антен. При аналізі дзеркальної антени, що опромінюється рупором, точності розрахунку методом інтегральних рівнянь та методом фізичної оптики показали результати, що відрізняються не більше ніж на 5%. Метод фізичної оптики дає точність для металевих моделей. Починаючи з певних розмірів випромінюючої структури, коли вирішити завдання методом моментів не вдається через неможливість розв'язання системи рівнянь, необхідне застосування методу фізичної оптики. При цьому час рахунку методом фізичної оптики в десятки разів менший, ніж при використанні методу інтегральних рівнянь.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено моделювання дзеркальної антени за допомогою програмного комплексу ANSYS HFSS. Програма HFSS ANSYS як гнучкий сучасний інструмент проектування складних антенних систем має різні опції, які дозволяють розраховувати завдання великих геометричних розмірів. У роботі показано, як одне велике завдання ділиться на кілька менших. Таким чином, гібридні методи, реалізовані в пакеті ANSYS HFSS, дозволяють використовувати цю програму для розрахунку великих дзеркальних антен. При аналізі дзеркальної антени, що опромінюється рупором, точності розрахунку методом інтегральних рівнянь та методом фізичної оптики показали результати, що відрізняються не більше ніж на 5%. Метод фізичної оптики дає точність для металевих моделей. Починаючи з певних розмірів випромінюючої структури, коли вирішити завдання методом моментів не вдається через неможливість розв'язання системи рівнянь, необхідне застосування методу фізичної оптики. При цьому час рахунку методом фізичної оптики в десятки разів менший, ніж при використанні методу інтегральних рівнянь.

У роботі порівнюються результати розрахунку при опроміненні дзеркала за допомогою стандартної рупорної антени та гофрованої рупорної антени тієї ж апертури. Показано, що гофрований рупор збільшує коефіцієнт спрямованої дії однодзеркальної антени на 2 дБ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Справочник по радиоэлектронике / Под ред. А. А. Куликовского. — М.: Энергия, 1967. — Т. 1. — 316 с.
2. И. П. Заикин, А. В. Тоцкий, С. К. Абрамов, В.В. Лукин. Проектирование антенных устройств СВЧ / Под ред. А. А. Куликовского. — Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. — С. 47. — 107 с.
3. Шифрин Я.С. Антенны. — ВИРТА им. Говорова Л.А., 1976. — С. 239-241. — 408 с.
4. E. Gazit, Improved design of the Vivaldi antenna, IEE Proceedings, vol. 135, pt. H, no. 2, April 1988, pp. 89–92.
5. Сазонов Д.М., Марков Г.Т. Антенны. М. Радио и связь 1973. 500 с.
6. Коган Б.Л. Поляризационные характеристики антенн. МЭИ. 2014. 95 с.
7. В. В. Муравйов, А. А. Тамело, Д. Ф. Молодкін, Д. Б. Володимиров
РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ АНТЕНН І ПРИСТРІЙ СВЧ
8. Курушин А. А., Лаврецкий Е. И., Дергачев С. А. Моделирование зеркальной антенны с помощью Ansys HFSS. Современная электроника, 2019, с.23
9. Computer Graphics Forum Volume 43, Issue 6., 2024 — P 14.
URL: (<https://onlinelibrary.wiley.com/toc/14678659/2024/43/6>) (Дата звернення 25.05.2025)