

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіоелектроніки
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра радіотехніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «Оптимізація МІМО-антени для діапазону 1800..2600МГц»

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи РТ-210м

Спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
«Радіотехніка»

Селянінов В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник Бугрова Т. І.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інститут інформатики та радіоелектроніки, ФРЕТ
 Кафедра Радіотехніка та телекомунікації
 Ступінь вищої освіти Магістр
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) «Радіотехніка»
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТТ

Морщавка С.В.

« » 20 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Селянінова Владислава Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Оптимізація МІМО-антени для діапазону 1800..2600 МГц

керівник проєкту (роботи) Бугрова Тетяна Іванівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «01» 11 2021 року №411

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

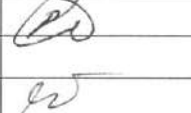
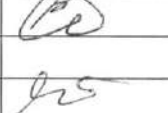
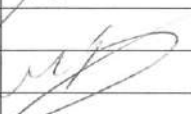
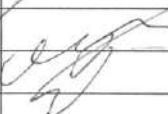
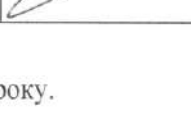
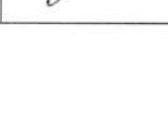
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) МІМО-антена для діапазону 1800..2600 МГц,
варіанти її покращення, проведення моделювання у ПЗ Ansys
HFSS

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити
Оптимізація розміру рефлектора, оптимізація відстані між вібратором та директором,
оптимізація відстані між сусідніми вібраторами та директорами, покращення
параметрів шляхом збільшення кількості
директорів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація дипломної роботи у Microsoft Powerpoint з аналізом антени, що буде
оптимізовано, поясненням алгоритму проведення дослідження та висновками щодо
проведеної роботи

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-2	Бугрова Т.І., доцент		
3	Севастьянов Р. В., доцент		
4	Якімцов Ю. В., доцент		
нормокон троль	Мороз Г.В., ст.викладач		

7. Дата видачі завдання « 1 » 09 2021 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Постановка задачі та мети роботи	1-й тиждень	
2	Визначення робочого об'єкту оптимізації	2-й тиждень	
3	Оптимізація розміру периметра	3-й тиждень	
4	Оптимізація розміру ліній центрів відношення та директорів	3-4 тиждень	
5	Оптимізація розміру ліній відношення та директорів	5 тиждень	
6	Визначення параметрів ліній	5-8 тиждень	
7	Визначення параметрів ліній	8-9 тиждень	
8	Визначення параметрів ліній	10-й тиждень	
9	Визначення параметрів ліній	11-й тиждень	
10	Визначення параметрів ліній	12-й тиждень	

Студент(ка)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис)

(підпис)

Селянінов В.В.

(прізвище та ініціали)

Бугрова Т.І.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 103 сторінки, 58 рисунків, 21 таблиця, 6 джерел

Об'єкт розробки: МІМО антена діапазону 1800-2600 МГц.

Мета роботи: провести дослідження з приводу покращення характеристик МІМО антени діапазону 1800-2600 МГц у ПЗ Ansys HFSS.

У даній роботі за допомогою Ansys HFSS буде розглянуто різноманітні варіанти покращення характеристик антени, а саме: додавання директорів, оптимізація розміру рефлектора, зміна відстані між директорами, оцінка робочого діапазону.

Вибір даної теми обумовлений тим, що не дивлячись на розвиток оптичного інтернету за містом все ще є великий попит на антени для 4G модемів та репітерів, які потрібні у зонах нестабільного прийому мобільної мережі. В умовах карантинних обмежень потреба тільки зросла, адже інтернет став відігравати роль не лише розважальну роль, а й став головним інструментом для навчання та роботи.

МІМО, МОДУЛЯЦІЯ, КСХ, ПІДСИЛЕННЯ, ДІАПАЗОН, ДІАГРАМА,
РЕФЛЕКТОР, ДИРЕКТОР, ВІБРАТОР, ДЕЦИБЕЛ, СИГНАЛ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП	7
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	12
1.1 Теоретичні відомості	12
1.2 Рекомендації стандартів 3GPP2.....	13
1.3 Внесення змін в схему антени. Постановка задачі.	17
2 АНАЛІЗ НАЯВНОЇ АНТЕНИ ТА ЇЇ ОПТИМІЗАЦІЯ	23
2.1 Оцінка робочого діапазону антени.....	23
2.2 Оптимізація розміру рефлектора.....	28
2.3 Оптимізація відстані між сусідніми вібраторами та директорами	46
2.4 Оптимізація відстані між вібратором та директором.....	50
2.5 Покращення параметрів шляхом збільшення кількості директорів	54
2.6 Порівняння модифікованої та не модифікованої антени.....	62
3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК	67
3.1 Опис ідеї та аналіз потенційних покупців	67
3.2 Планування робіт	72
3.3 Побудова мережевого графіку	74
3.4 Розрахунок витрат.....	75
3.5 Розрахунок економічної ефективності НДР.....	80
3.6 Розрахунок фінансового результату	82
3.7 Висновки економічного розділу	83
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	85
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	85
4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки.....	86
4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці	88
4.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	94
ВИСНОВКИ.....	100
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	103

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

дБ	–	децибел
КВП	–	коефіцієнт використання площі
КСХ	–	коефіцієнт стоячої хвилі
МГц	–	мегагерц
ПЗ	–	програмне забезпечення
ЧТП	–	частотно-територіальне планування
FEM	–	Finite Element Method
MIMO	–	Multiple Input Multiple Output
MoM	–	Method of Moments

ВСТУП

Радіозв'язок є важливим та незамінним інструментом для вирішення різноманітних завдань у 21 столітті, починаючи від побутових і закінчуючи військовими потребами. Він дозволяє, на відміну від кабельних мереж, організувати передачу голосу, даних, відео та ін. у дуже короткий строк, без прокладання кабелю або оптики, що дуже зручно, або навіть являється єдиним варіантом вирішення поставленої задачі. Тому роль передачі інформації через радіоканали є та буде дуже важливою. Для створення стабільних та якісних радіоканалів необхідно вирішити цілий ряд проблем. Велику роль грає якісна та правильно розрахована і виготовлена антена, саме від неї залежить чи зможе передатчик та приймач працювати так, як було задумано виробником обладнання.

Історія радіозв'язку починалася ще у 19 сторіччі. Німецький вчений Генріх Рудольф Герц, працюючи професором фізики технічного університету, в 1887-1888 роках провів роботи по спостереженню електромагнітних коливань, відкрив спосіб створення і виявлення електромагнітних хвиль (тобто довів реальність електромагнітних хвиль). Через декілька років в Сполучених Штатах Америки винайшов і запатентував передавач Нікола Тесла. Вже в 1893 році Тесла відправляв сигнали на відстань до 30 миль, а в 1895 він же створив приймач, принципи якого використовуються й досі. У радіопередавачі Тесли коливальний контур (джерело радіосигналу) модулювався акустичним сигналом, а приймач здійснював перетворення радіосигналу в акустичний звук.

Протягом всього 20-го сторіччя йшов бурний розвиток радіозв'язку, але нас цікавлять події наприкінці сторіччя, коли починають масово з'являтися мобільні мережі, розвиваються різноманітні способи доступу до мережі інтернет, у тому числі з використанням радіоканалів. Попит на ці технології підштовхував розробників невпинно модернізувати способи передачі і отримання інформації, голосу та ін. Наслідком цього розвитку є

все те, що ми маємо у нашому світі зараз. А саме, доволі велике покриття високошвидкісними мережами третього та четвертого поколінь (так звані 3G та 4G мережі). Які дозволяють у зоні покриття отримувати доступ на великій швидкості у мережу інтернет, що є дуже актуальним у останні роки пандемії для роботи, навчання та розваг.

Але, неможливо забезпечити наявність покриття таких мереж на всій території планети, або навіть країни чи міста яке було б доступно на звичайний смартфон чи USB модем для доступу з персонального комп'ютера. Для вирішення питання доступу до таких мереж у зонах з поганим чи нестабільним прийомом призвані зовнішні антени, які мають набагато вищий коефіцієнт підсилення, ніж вбудовані у смартфон чи модем, та розташовуються ззовні будівель, над дахом, де сигнал завжди кращий ніж у приміщеннях.

Антену, яку буде розглянуто у дипломному проекті, може бути використана для 4G, 3G модемів, щоб отримувати інтернет у тих місцях куди кабельні мережі ще не дійшли. Другим варіантом використання є репітери, для підсилення сигналу у приміщеннях з нестабільним прийомом стільникової мережі.

Конструкція антени є доволі унікальною з точки зору компоновання. Виробник серед параметрів заявляє лише коефіцієнт підсилення у 17 дБ та діапазон робочих частот 1700-2700 МГц. Тому буде проведено аналіз оригінального креслення антени для перевірки заявлених параметрів. Також буде проведена робота з пошуку варіантів покращення характеристик, якщо це можливо.

Робота з моделювання буде проводитися у потужному програмному забезпеченні Ansys HFSS (High Frequency Structural Simulator). Програмний пакет Ansys HFSS, як і всі інші сучасні пакети (CST Studio, Altair FEKO, COMSOL Multiphysics) підтримує 3 методи розрахунку СВЧ-структур:

- розрахунок в часовій області (time-domain), методами рішень рівнянь Максвела FDTD (Finite-Difference Time-Domain). В цьому методі

модель збуджується одиночним імпульсом певної форми і аналізується її спектральний відклик в часі (*spectral transient solution*). Перевага методу можливість отримання параметрів пристрою в широкій смузі частот лише за 1 розрахунок. Недолік - більша похибка, яка зростає при відступі від частоти, на якій імпульс збудження мав найбільшу енергію;

– розрахунки в частотній області (*frequency-domain*). В цих методах модель збуджується незатухаючими гармонічними коливаннями заданої частоти, аналізується поведінка полів лише на частоті розрахунку. Ці методи мають меншу похибку, похибка не залежить від частоти, але для аналізу в широкій смузі частот час розрахунку може рости на 2 порядки (в 100 разів). Для антени, що працює у відносно невеликій смузі частот 1700-2800 МГц для аналізу з грубим кроком 25 МГц необхідно провести 50 розрахунків, що в 50 разів збільшує час розрахунку. Для аналізу з кроком 10 МГц потрібно провести 120 розрахунків, що більш як на 2 порядки сповільнює час отримання результатів. Проте якщо часовий бюджет дозволяє провести розрахунки цими методами, похибки будуть менші ніж в спектральних методах. В частотній області успішно використовуються 2 методи розрахунку, які кардинально різняться між собою:

- а) метод моментів (MoM, MM, Method of Moments);
- б) метод скінченних елементів (*finite element method*, FEM).

В методі МоМ геометрія моделі розбивається на трикутники лише на поверхнях металів. Розраховується вплив «всіх на всіх». Цей метод є найточнішим методом електродинаміки, але його можливості швидко вичерпуються. Для ряду конструкцій у яких відомі точні аналітичні фундаментальні рішення (півхвильовий диполь Герца, двохпровідна лінія передачі з круглих провідників) метод моментів за долі секунди видає результат, який відрізняється від аналітичних рішень менше ніж на десяти долі Ома і менше ніж на 0,005 дБ для параметрів дальнього поля. Цей метод також лежить в основі програмних підкомплексів PlanarEM, HFSS 2D Solver

та HFSS Q3D, які з величезною точністю рахують елементи друкованих плат, зосереджені індуктивності, ємності, переходи.

Недолік методу, через який він не набув поширення в 3-мірних симуляторах (HFSS, CT) – експоненційний ріст обчислювальної складності з ростом числа елементів. Для сучасних комп'ютерів практична стеля складає 20 000 трикутних елементів сітки. Реальні комерційні конструкції неможливо обрахувати, для прикладу один лише SMA-конектор від компанії Amphenol має 30 000 елементів сітки в моделі HFSS.

Метод МоМ дуже добре підходить для академічних досліджень різних структур та швидких чорнових розрахунків окремих елементів проекту. Якщо модель антени типу «Petra» вдасться втиснути в 20 000 елементів сітки, такий розрахунок дасть найточніші параметри дальнього поля (діаграму направленості, коефіцієнт підсилення, коефіцієнт завадозахищеності).

Метод FEM не має обмежень методу МоМ, оскільки в ньому рахується вплив виключно сусідніх елементів на своїх сусідів. Обчислювальна складність росте прямо пропорційно кількості елементів. Це дозволяє проводити симуляції пристроїв з дуже великою деталізацією конструктиву (включно до приборних фланців або відрізків коаксіальних кабелів живлення), яка недоступна методу МоМ. Доступні домашні ПК з обсягом оперативної пам'яті 32 Гб дозволяють рахувати методом FEM моделі на 1-1,5 млн. елементів сітки. В ряді випадків, якщо модель має строгу осьову симетрію, можливо порахувати модель на 2-3 млн. елементів, розділивши її навпіл та використовуючи граничну умову “Симетрія відносно площини розрізу”.

Отриманню параметрів дальнього поля з невеликою похибкою (менше 0.5 дБ по ДН в головній пелюстки, менше 2 дБ в бокових і задніх пелюстках) по методу FEM перешкоджає необхідність заповнювати сіткою тетраєдрів весь об'єм граничної умови “absorbing boundary condition”. Згідно рекомендацій виробника (AppNote від Ansys) та згідно наукових статей опублікованих в міжнародному журналі IEEE, якщо необхідна підвищена

точність розрахунків параметрів дальнього поля (особливо ДН), то початкове значення сітки розбиття «boundary condition» повинно бути $\lambda/10$, при тому що значення за замовчуванням $\lambda/3$. Ущільнення сітки в 3 рази по лінійних розмірах приводить до 27-кратного збільшення кількості елементів і робить модель недосяжною для обрахунку на домашніх ПК.

Антену можна проаналізувати методом МоМ, якщо здійснити 2 спрощення:

- не деталізувати схему узгодження та переходу на коаксіальні приборні фланці. Збудження моделі подавати через зосереджений диференціальний порт, таким же чином як успішно моделюються дипольні антени (півхвильовий вібратор, хвильові канали). Спосіб виконання узгодження та влаштування коаксіального переходу не впливають на параметри дальнього поля;

- використати граничні умови типу *PerfectE*, які назначити на плоску 2-вимірну модель антени. В такому разі лист металу розбивається на сітку трикутників лише з однієї сторони (проте в розрахунках беруть участь розрізнено дві сторони трикутника).

Для зменшення похибки розрахунків початкову сітку розбиття зменшимо до $\lambda/12$ (значення за замовчуванням $\lambda/6$). Недолік реалізації методу МоМ в програмному пакеті Ansys HFSS – сітка розбиття ущільнюється лише на одній частоті розрахунку (її бажано ставити ближче до верхньої робочої частоти пристрою). Сітка розбиття, яка досягає бажаних параметрів $\Delta S < 2\%$ на частоті 2600 МГц, може бути недостатньо густа для частоти 1800 МГц, якщо на інших частотах в роботу вступають ділянки пристрою, які на 2600 МГц не відігравали значної ролі (градієнт поля в цій ділянці пристрою на 2600 МГц був невеликим, а на 1800 МГц навпаки великий). Для зменшення цього явища, використаємо початкову сітку в 2 рази густішу, ніж значення за замовчуванням. Сумарна кількість трикутників розбиття склала близько 16 000, що дозволяє за прийнятний час на сучасних процесорах проводити симуляції та експерименти.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Теоретичні відомості

Перед практичними роботами у Ansys HFSS треба теоретично познайомитися з вимогами щодо виконання антен для подальшого поставлення цілей дослідження.

Електричні вимоги (специфікації) до антен LTE/GSM.

Електричні параметри будь-яких антен можна віднести до 3 категорій:

а) параметри дальнього поля антени (Far-field):

- поляризація антени, рівень частоти лінійної поляризації для антен з лінійною поляризацією (рівень небажаної ортогональної поляризації), степінь еліптичності для антен з круговою поляризацією (AxialRatio);

- кросс-поляризаційні характеристики (рівень небажаної ортогональної поляризації);

- діаграма направленості (radiation pattern), рівень направленості в головній пелюстці ДН (направленість або ж підсилення антени), рівні бокових та задніх (небажаних) пелюсток, рівень провалу між пелюстками. Направленість (або ж підсилення) антени можна виражати як у відносних одиницях нормованих до ізотропа (dBi), так і в одиницях діючої апертури (m^2). Рівень задніх пелюсток можна виражати як в рівнях dBi цих пелюсток, так і відносно випромінювання в головному напрямку (параметри Front/Back або Front/Rear). Якщо підсилення антени виражають в одиницях апертури, то часто використовують значення КВП (Коефіцієнт Використання Площі, Aperture Efficiency), де за 100% береться геометрична площа фронтальної проекції виробу. Для антен панельної компоновки КВП показує наскільки ефективно використовується площа антени, чи відповідають габарити цієї антени досягнутому підсиленню;

- фазова діаграма направленості, положення фазового центру випромінювання (якщо він сферичний), рівень відхилень фази по

сферичному фронту, зміна положення фазового центра в широкій смузі частот (для широкосмугових антен);

- дослідження впливу на параметри дальнього поля (спотворення діаграми направленості, погіршення крос-поляризаційної ізоляції) в конкретному місці монтажу антени: вплив кабелів, мачт, споруд і будівель, транспортних засобів, інших антен. В разі, якщо такий вплив істотний і його можна мінімізувати – виробленням рекомендацій для монтажу;

б) модальні параметри, або S-параметри багатополюсника:

- S-параметри антени: коефіцієнт відбиття S_{11} , запис S-матриці в полярній нотації (діаграма Вольперта-Сміта) або ж запис в формі похідних Z-матриць комплексного опору (дійсна частина – активний опір, та уявна частина – реактанс антени), або похідний від S_{11} графік КСХ;

- для багатопортових антен (MIMO, багатодіапазонні антени з окремими портами на кожен діапазон) міжпортова розв'язка (ізоляція) $S_{1,2}$ та ін.;

в) тепловий ККД та максимальна потужність безпечної експлуатації:

- оцінка теплових втрат на розігрів металів і діелектриків антени, оцінка теплового ККД антени;

- оцінка допустимих навантажень при роботі на передачу, максимальна допустима потужність збудження, при яких елементи антени не нагріваються вище допустимих значень, а в ізоляторах не настає іскровий пробій.

1.2 Рекомендації стандартів 3GPP2

Рекомендації стандартів 3GPP2 (GSM та LTE) щодо абонентських антен регулюють дуже мало аспектів. Для коректної роботи на повній швидкості передачі даних, антени LTE повинні відповідати лише трьом умовам:

а) поляризація антен лінійна, для GSM це вертикальна поляризація (V-pol), для LTE це X-поляризація: дві абонентські антени, одна лінійної поляризації під кутом -45° до горизонту, інша $+45^\circ$ до горизонту. В стандартах UMTS (3G) за бажанням оператора може використовуватися як X-pol, так і вертикальна або кругова поляризація;

б) розв'язка між просторовими каналами передачі даних по технології MIMO 2x2 повинна складати не менше 15 dB (рекомендація 3GPP2). Розв'язка повинна бути забезпечена як на рівні міжпортової розв'язки ($S_{1,2} < -15$ dB) так і крос-поляризаційної якості антени. При ізоляції менше як 13 dB LTE канал буде працювати, але з меншою ефективністю. При розв'язці 8 dB і менше другий просторовий канал не переносить жодної цінної інформації, ефективна канална швидкість передачі даних від базової станції до абонента падає в 2 рази від номінальної. Максимальна канална швидкість передачі даних від базової станції до абонента в Cat. 4 може досягати 150 Мбіт, за умови що просторова розв'язка в MIMO 2x2 не менше 15 dB. При розв'язці 8 dB і менше канална швидкість не може перевищити 75 Мбіт. Абонентське обладнання (модеми та смартфони) не відображають ні каналну швидкість, ні ступінь розв'язки MIMO. У споживачів немає інструментів як відрізнити недобросовісну антену від якісної. Вимірювання розв'язки в лабораторних умовах нетривіальна задача (порівняно з вимірюванням підсилення та графіка KSCX), тому антени з розв'язкою менше 10 dB широко захопили ринок і завдають суттєвого збитку економіці. Один долар економії на неякісній абонентській антені завдає десятки тисяч доларів збитку національній економіці на необхідності закупівлі та будівництва додаткового обладнання 4G, яке компенсує зниження ємності мереж через неякісні абонентські антени;

в) частотний діапазон антени повинен відповідати частотам, які використовує оператор, а для можливості ефективного використання переваг агрегації частот (Carrier Aggregation) абонентська антена повинна підтримувати одночасно всі діапазон частот, які наявні на базовій станції.

Якщо антена по специфікаціях не підтримує якийсь з діапазонів, агрегація все рівно буде працювати, але швидкість передачі даних буде значно нижчою ніж можлива в заданих умовах. В тому діапазоні частот, де антена має менше підсилення, меншу міжпортову розв'язку або вищий КСХ, сигнал буде слабший ніж в іншому каналі «агрегації» і сумарна швидкість після агрегації буде значно нижча, ніж могла б бути з правильно підбраною антеною.

Всі інші параметри антен формуються на відкритому конкурентному ринку і залежать від локальних особливостей.

Що стосується коефіцієнту підсилення антен (направленості головної пелюстки), то на ринку успішно продаються антени від +8...+9 dBi (однопатчеві антени, магнітоелектричні диполі, класичні диполі) до +18....+20 dBi (крупні панельні антени, що складаються з 4 антен досліджуваного нами типу, тобто містять $4 \times 4 = 16$ елементів фазованої решітки).

Антени крупного панельного типу користуються невеликим попитом, для окремих, особливо складних умов прийому. Ці антени в 2-4 рази крупніші і в 2-4 рази дорожчі за досліджувану антену. Дуже рідко це додаткове підсилення дозволяє отримати більшу швидкість передачі даних. В межах зони покриття базової станції енергетика радіолінку така, що можна отримати максимальні режими модуляції та пропускну здатності (RB, QAM) з антеною порядку 10-13 dBi (підсилення 10-20 разів). Подальше підсилення не збільшує каналну швидкість передачі даних.

За межами зони покриття базової станції (залежить від рельєфу місцевості, висоти антен оператора) напруженість поля падає так різко, що крупніша антена практично не розширює зону обслуговування базової станції. Причина цього явища криється в особливостях технології LTE. В мережах 2 і 3 покоління (GSM та UMTS) частотно-територіальне планування каналів зв'язку відбувалося з розподілом секторів на різні частотні підканали. Різні сектори оператора працювали на різних частотах та не заважали один одному. В мережах 4 покоління (LTE) від такого поділу відмовилися і

перейшли до ЧТП з reuse factor = 1. Всі сектори всіх базових станцій випромінюють однакову повну смугу частот, яку оператор отримав від держави. Для того, щоб досягти додатних значень співвідношення сигнал/шум (SINR), оператори ретельно обмежують зони покриття антен базових станцій, таким чином щоб вони не перетиналися з іншими секторами. Для цього: знижують висоту підвісу антен, нахиляють діаграму направленості до землі (down-tilt), зменшують потужність випромінювання. Якщо в епоху 2G при виборі місця для будівництва базової станції підшукували найвищу точку з найбільшою зоною покриття, то в епоху 4G додаткові базові станції монтують так, щоб використовувати складний рельєф місцевості для обмеження дальності засвітки і запобігання небажаної засвітки сусідніх секторів.

Такий підхід може не стосуватися одиноких висотних базових станцій в сільській місцевості, біля трас. Проте в населених пунктах (навіть невеликих селищах, дачних масивах, курортах) де потрібно встановити 2-3 або більше базових станції для підвищення ємності мережі – нові бази будуються в ложбинах, в оточенні забудови чи лісу. В таких умовах крупні абонентські антени практично не впливають на радіус зони покриття. На межі, де сигнал цього сектора починає затухати, перепад може різко досягати 20-30 дБ і навіть крупна антена з 4-кратною апертурою (+6 dB) не виправить ситуацію.

Ще одна перешкода для ринку крупних антен – це низький SINR за межами зони обслуговування, навіть якщо вдасться підсилити сигнал до прийнятного рівня.

Фазована антенна решітка на 4 елементи 2x2 довела свою оптимальність по габаритах, ціні та впливу на каналну швидкість передачі даних. Менша антена в більшості випадків видасть таку ж каналну швидкість, проте не є суттєво дешевою у виробництві і не є суттєво компактнішою з позицій монтажу та естетики. Більші ж решітки суттєво дорожчі, оскільки матеріалоемність там строго пропорційна, а затрати на

збирання і налаштування навіть непропорційно вищі (узгодження 2 або 4 антен в стек класичними фазувальними лініями досить трудомістка задача). Досліджувана антена не містить протяжних фазувальних ліній які необхідно монтувати на прецизійній невеликій висоті від земляного полігону і є відносно простою для збирання та налаштування. Антени з більшою кількістю антенних решіток, які з'єднані між собою протяжними прецизійними лініями з повітряною ізоляцією необхідно дуже ретельно монтувати щоб витримати прецизійний зазор по всій довжині, а також здійснювати тонке налаштування антени на вимірювальному стенді, оскільки прецизійність монтажу неможливо досягти. Обладнання, яке може формувати пластикові кришки великого розміру, непропорційно дорожче за формувачі малогабаритних деталей.

В світовій літературі, на заводах Китаю, ЄС та США антени досліджуваного типу ніде не описані і ніким не вироблялися. З якісних антен іноземні компанії випускають лише магнітоелектричні диполі, класичні диполі та однодіапазонні патч антени. Для випадків, коли підсилення одиночної антени 8-9 dBi недостатньо, іноземні компанії випускають класичні фазовані антенні решітки з довгими фазувальними лініями на коаксіальних кабелях та дуже складним узгодженням. Такі антени в 20 разів дорожчі за одиночну антену, навіть від китайських виробників, що торгують на майданчиках по типу Alibaba та Aliexpress фазовані антенні решітки 2x2 продаються по ціні від \$200, в той час як досліджуваний варіант антени з кращими електричними параметрами, меншими габаритами і вагою можливо купити по ціні від \$20 до \$40.

1.3 Внесення змін в схему антени. Постановка задачі

В потенційного виробника, чи замовника, будь-яких антен завжди виникають безліч запитань роду “Що буде, якщо”. Такі питання є

природними в будь-яких галузях техніки, сприяють прогресу, винаходам та оптимізаціям давно відомих конструкцій.

Питання такого типу при проектуванні можна розділити на три класи:

- пов’язані з впровадженням антени у виробництво і адаптації креслень під наявні технологічні можливості та оптимізація собівартості матеріалів і технологічних операцій;
- пов’язані з внесенням принципових змін в конструкцію, які б могли суттєво змінити електричні параметри та по можливості покращити їх;
- пов’язані з обходом обмежень на авторські права, внесення в конструкцію таких змін, які б дозволили уникнути позовів про захист авторських прав.

Численні виробники антен задаються великою кількістю запитань з усіх цих трьох категорій:

- а) питання впровадження:
 - допустиме зменшення розмірів рефлектора для здешевлення вартості термоформувального обладнання;
 - пошуки альтернатив дороговартісним дистанційним стійкам для кріплення патчів;
 - спроби уникнути від необхідності купівлі лазерного станка за рахунок використання недорогого ламінату FR4 для всіх елементів конструкції (як патчі так і фазувальні лінії);
 - спроби уникнути необхідності купівлі лазерного станка за рахунок використання мідних електричних дротів при виготовленні фазувальних ліній;
 - експерименти з товщиною оцинковки, спроби використати дешевші листи 0,3 мм замість стандартних 0,5 мм;
 - експерименти з способом кріплення фазувальних ліній до патчів: стик, нахлест, заклепка, пайка або болти і гайки;
 - можливість уникнути виробництва другого рівня патчів та обійтися однорівневими патчами;

- можливість заміни фазувальних ліній з балуном Рутроф на друковану плату балуна Гуанелли 4:1 з матеріалу FR4;

б) внесення принципових змін в конструкцію:

- вивчення можливості нарощення коефіцієнта підсилення за рахунок додавання директорної структури типу “хвильовий канал”;

- влаштування бортиків або рупорного рефлектора для збільшення коефіцієнта підсилення або пригнічення випромінювання задньої напівсфери;

- вивчення можливостей комбінування під однієї кришкою антен на додаткові діапазони: Lo-Band (690-960 MHz) або 5G n78 (3300-3800 MHz);

- способи монтажу в фазовану решітку кількох антен для збільшення коефіцієнта підсилення;

- способи виробництва “половинчатих” антен типу «Petra» (однорядна решітка 1x2) для застосувань де вимагається мініатюрність;

- можливість покращити електричні параметри на одному діапазоні за рахунок відмови від роботи в інших діапазонах;

в) способи обходу можливих патентів на конструкцію антени:

- подвоєння кількості балунів Рутроф;

- влаштування додаткового земляного полігону та заміна патчів на їх щілинні еквіваленти;

- використання патчів багатокутної форми для візуальної відмінності.

На багато питань з цього переліку дали відповіді власники патентів антен зі схожими конструкціями:

- патент захищає два способи виконання антени: з фазувальними лініями та балуном Рутроф (лазерна порізка оцинковки), та з друкованим балуном Гуанелли 4:1 на ламінаті типу FR4. Як патентовані вироби, так і піратські клони випускають антени в обох виконаннях – і в цинковому і з друкованими платами FR4;

- тримач патенту в різні роки випускав антену з різним способом кріплення фазувальних ліній. Ранні версії випускалися з цільного куска

металу, пізні версії вироблялися на заклепках внахлест. Це різко скорочує непродуктивні витрати оцинковки;

- випускається великий асортимент з 4 варіацій антени: класична, половинчата, подвоєна;

- способи виконання фазувальних ліній в різні роки використовувалися різні, як з Т-трійником так і з балуном Рутроф.

Для збільшення на 2 дБ коефіцієнту підсилення в діапазоні LTE-1800 можна відмовитися від підтримки діапазону LTE-2600 і збільшити розміри антени Petra. Таким чином можна отримати параметри здвоєної антени за ціною і розмірами одинарної антени. Але у даному випадку ми не будемо відмовлятися від широкосмуговості, адже антена під один конкретний діапазон це не найкращий варіант, тому що у такому випадку ми зможемо розраховувати тільки на те, що у місці встановлення оператор використовує потрібний діапазон, та він не є перевантаженим. Для вирішення питання перевантаження окремих діапазонів розробники стандарту четвертого покоління пропонують використовувати обладнання яке дозволяє одночасно використовувати два, чи навіть більше діапазонів одночасно, що дозволяє значно підвищити швидкість передачі. По стандарту четвертого покоління максимальна ширина смуги пропускання дорівнює 20 МГц, а з використанням Carrier Aggregation (так званої «агрегації», тобто об'єднання декількох смуг радіочастот) можливо використовувати до 7-ми несучих, тобто одразу 140 мегагерц.

Основні переваги «агрегації» є у наступному:

- а) збільшення ширини пропускання, що використовується, що призводить до зростання швидкостей передачі даних в секторі;

- б) підвищення ефективності використання радіоресурсів. Об'єднання частотних каналів (діапазонів) дозволяє досягти як збільшення спектру, так і інші переваги від динамічного розподілу ресурсів передачі даних у межах всього об'єднаного діапазону. Що веде до збільшення ємності сектора і поліпшення користувацького досвіду. Наприклад, якщо користувач

потрапив у перевантажений сектор на одному частотному діапазоні, то він може бути відразу використовувати і інший діапазон, що дозволяє підтримувати рівень досвіду користувача QoS (Quality of Experience);

в) оптимальне використання частотного ресурсу, яким володіє оператор. Переважна більшість операторів має фрагментований частотний ресурс, який, до того ж, може бути різної ширини та розташований в різних частотних діапазонах. Агрегація дозволяє об'єднати цей частотний ресурс та використовувати його одним блоком для обслуговування абонентів. Крім цього, це дозволяє уникнути обмеження ширини пропускання і використовувати канал з більшою шириною (якщо, звичайно, у оператора є такий ресурс).

Можливі такі варіанти об'єднаних несучих:

- суміжні – це найпростіша форма реалізації агрегації несучих у четвертому поколінні. При цьому варіанті несучі знаходяться на сусідніх каналах поруч. У цьому випадку потрібен лише один приймач, оскільки сигнал розглядається як один розширений;

- несуміжні – трохи складніше у виконанні, несучі використовують одну й ту саму робочу смугу, але не є сусідами один з одним. Тут вже потрібні два прийомопередавачі, тому що, сигнал не може розглядатися як один цілий, що збільшує складність та вартість рішення;

- несуміжні в різних діапазонах – ця форма агрегації несучих використовує смуги в різних діапазонах. Це складніше завдання, оскільки несучі знаходяться у різних робочих діапазонах. Таким чином, потрібно кілька приймачів для передачі та прийому сигналів. Цей тип найдорожчий і найскладніший у реалізації.

Обладнання для об'єднання 7-ми несучих існує і є на ринку, але коштує дуже дорого, також наші оператори не мають стільки частотного ресурсу. Більш реальним для реалій нашої країни є використання «агрегації» двох смуг радіочастот у діапазоні 1800 та 2600 МГц. Обладнання яке дозволяє приймати дві смуги одночасно коштує не дуже дорого, та має хорошу

підтримку і доступність у операторів. Саме тому антену слід оптимізувати для роботи у діапазоні 1700-2700 МГц, що дозволить охопити найпопулярніші діапазони, та оптимально використовувати всі можливості які можуть нам дати мобільні оператори.

2 АНАЛІЗ НАЯВНОЇ АНТЕНИ ТА ЇЇ ОПТИМІЗАЦІЯ

Запроектуємо антену у Ansys HFSS, для нашої роботи виберемо метод МоМ, повний опис процесу приводити не має сенсу, тому що він буде дуже великого об'єму. Одразу перейдемо до моменту коли антена повністю намальована і всі параметри задані. Результат можна побачити на рисунку 2.1.

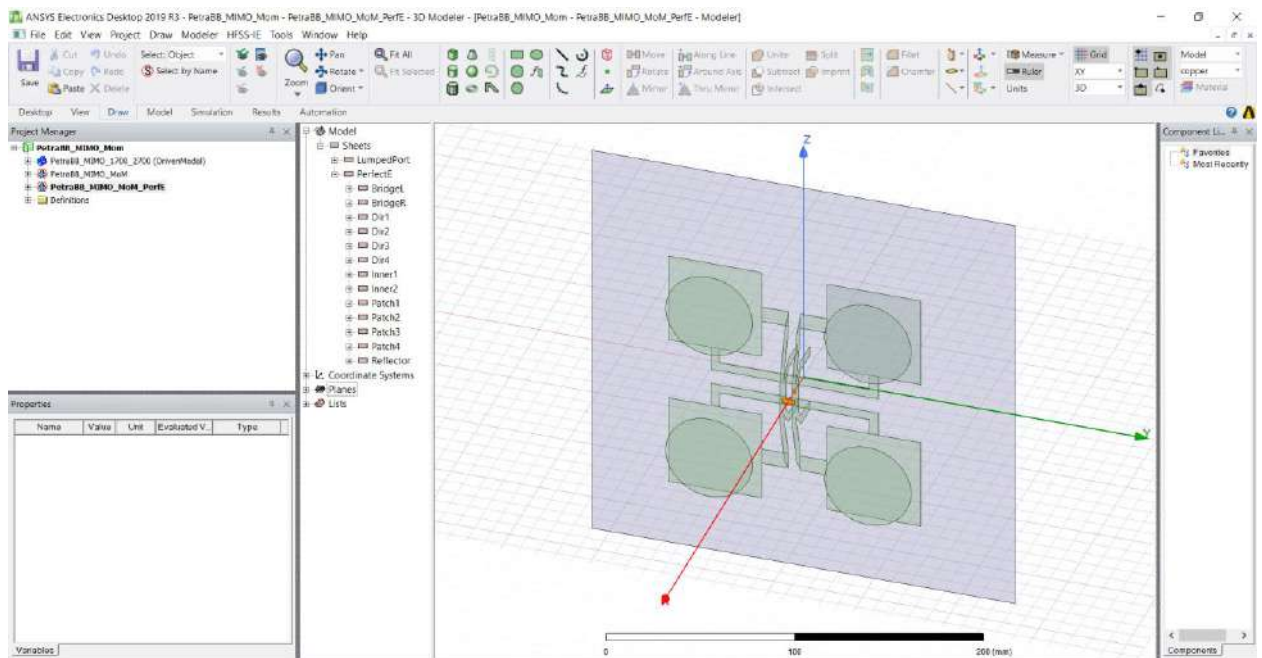


Рисунок 2.1 – Готова антена у Ansys HFSS

Далі можна перейти до виконання поставлених задач.

2.1 Оцінка робочого діапазону антени

Оцінимо робочий діапазон антени, для цього намалюємо наявну антену за допомогою програми Ansys HFSS та виведемо такі графіки: КСХ, Коефіцієнт підсилення, Міжпортова розв'язка (наявна антена має 2 виходи для режиму МІМО 2х2, який має свої умови роботи).

Нас будуть цікавити усі діапазони які у даний час, та у найближчому майбутньому можуть бути використані в нашій країні. Зараз оператори використовують такі діапазони як 900 МГц, 1800 МГц, 2600 МГц. Згодом має бути задіяний діапазон 2100 МГц (наразі використовується лише під третє покоління зв'язку). У Європі, з якою наша країна синхронізує використання частот задіяні ще низка діапазонів, а саме: 700 МГц, 800 МГц, 2300 МГц.

Діапазони частот вище 2700 МГц для четвертого покоління мало розповсюджені, але для п'ятого покоління задіяні і більш високі частоти. Тому також оцінимо придатність нашої антени найближчого діапазону до четвертого покоління, а саме «п78» 3300 – 3800 МГц TDD.

Отримані параметри у різних діапазонах наведено нижче у таблицях 2.1-2.8.

Таблиця 2.1 – Отримані данні для діапазону LTE 700 (703-803 МГц)

Частота, МГц	Вивантаження (Uplink) 703-748	Завантаження (Downlink) 758-803	Середня частота (Average) 753
Підсилення, дБ	8,26	8,42	8,35
Ізоляція портів, дБ	-63,12	-60,71	-61,9
КСХ	44,7	46,9	46,3

Таблиця 2.2 – Отримані данні для діапазону LTE 800 (791-862 МГц)

Частота, МГц	Вивантаження (Uplink) 832-862 МГц	Завантаження (Downlink) 791-821 МГц	Середня частота (Average) 862,5 МГц
Підсилення, дБ	8,6	8,47	8,66
Ізоляція портів, дБ	-59,54	-59,71	-59,7
КСХ	46,65	47,37	45,94

Таблиця 2.3 – Отримані данні для діапазону LTE 900 (880-960 МГц)

Частота, МГц	Вивантаження (Uplink) 880-915 МГц	Завантаження (Downlink) 925-960 МГц	Середня частота (Average) 920 МГц
Підсилення, дБ	8.78	8.92	8.81
Ізоляція портів, дБ	-61.02	-62.27	-63.53
КСХ	44.04	42.88	41.33

Таблиця 2.4 – Отримані данні для діапазону LTE 1800 (1710-1880 МГц)

Частота, МГц	Вивантаження (Uplink) 1710-1785	Завантаження (Downlink) 1805-1880	Середня частота (Average) 1795
Підсилення, дБ	12.34	12.71	12.53
Ізоляція портів, дБ	-53.78	-54.60	-54.37
КСХ	2.41	1.59	1.89

Таблиця 2.5 – Отримані данні для діапазону LTE 2100 (1920-2170 МГц)

Частота, МГц	Вивантаження (Uplink) 1920-1980	Завантаження (Downlink) 2110-2170	Середня частота (Average) 2045
Підсилення, дБ	13.07	13.23	13.15
Ізоляція портів, дБ	-54.18	-54.71	-53.78
КСХ	1.13	1.47	1.17

Таблиця 2.6 – Отримані данні для діапазону LTE 2300(TDD)
(2300-2400 МГц)

Частота, МГц	Середня частота (Average) 2350 МГц
Підсилення, дБ	14.58
Ізоляція портів, дБ	-48.77
КСХ	1.79

Таблиця 2.7 – Отримані данні для діапазону LTE 2600 (2500-2690 МГц)

Частота, МГц	Вивантаження (Uplink) 2500-2570	Завантаження (Downlink) 2620-2690	Середня частота (Average) 2595
Підсилення, дБ	15.32	15.5	15.64
Ізоляція портів, дБ	-47.74	-44.97	-44.5
КСХ	1.59	1.64	1.59

Таблиця 2.8 – Отримані данні для діапазону 5G NR 3500
(3300-3800 МГц)

Частота, МГц	Середня частота (Average) 3550 МГц
Підсилення, дБ	2.7
Ізоляція портів, дБ	-56.06
КСХ	3.82

Далі подивимось на отримані графіки, щоб наочно побачити отримані параметри в залежності від частоти (рис. 2.2-2.4).

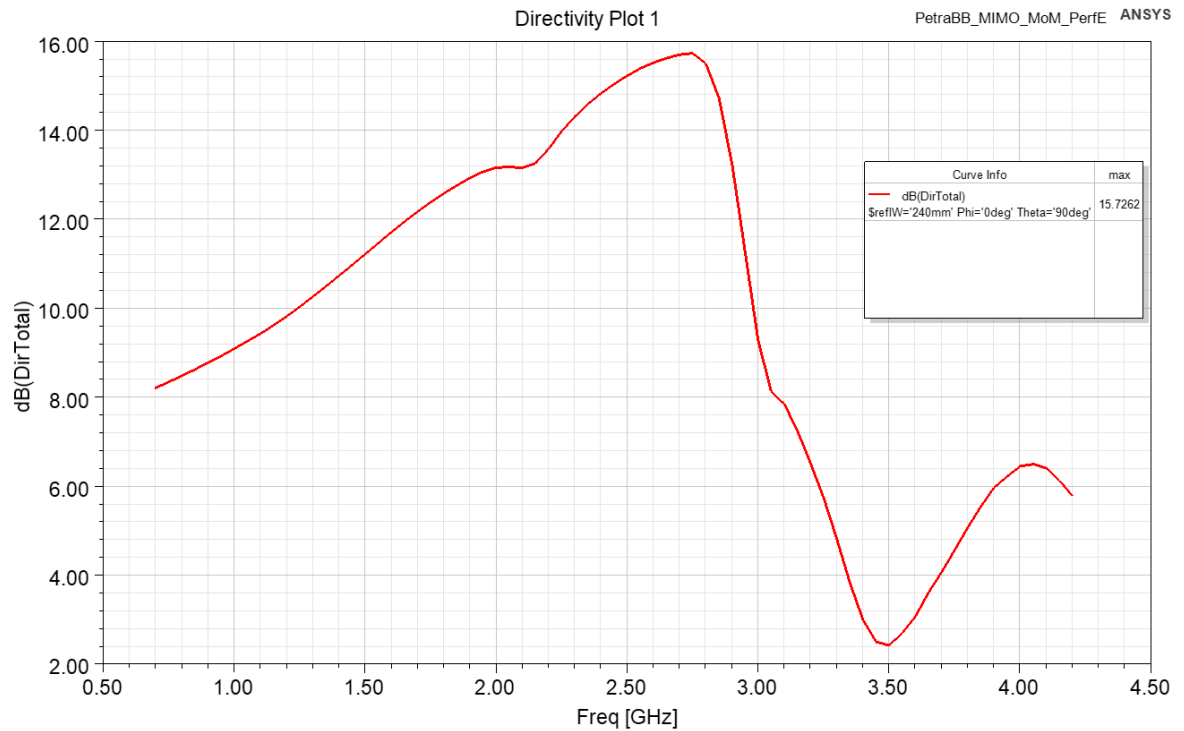


Рисунок 2.2 – Графік коефіцієнту підсилення в залежності від частоти

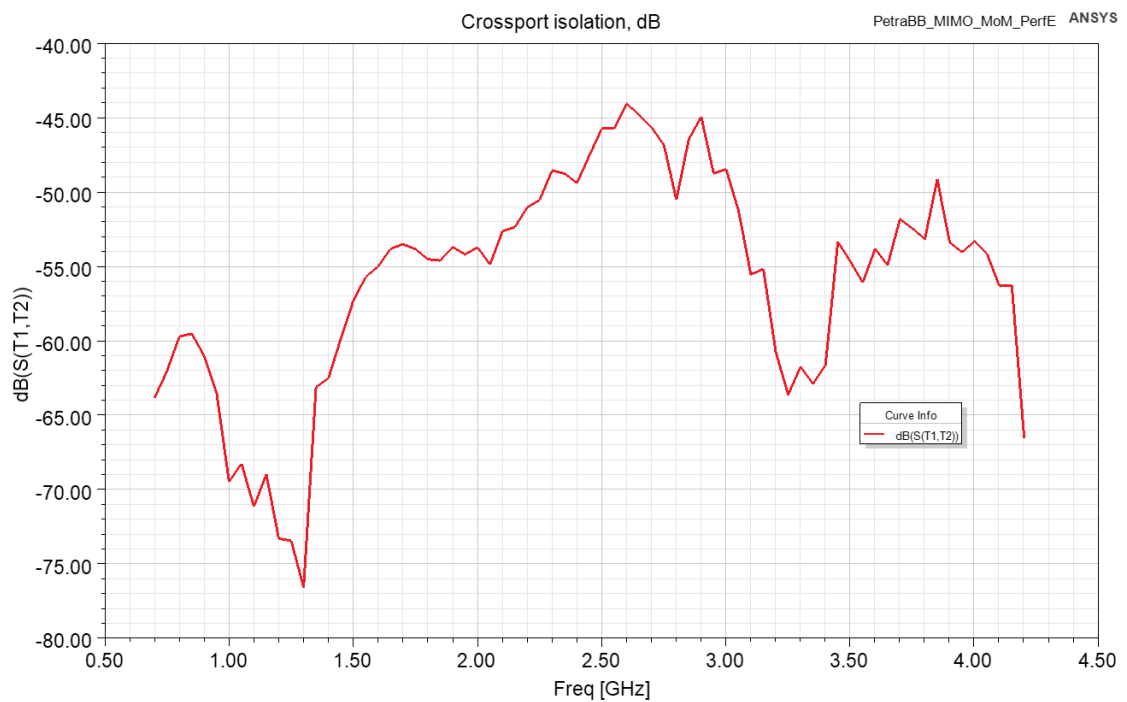


Рисунок 2.3 – Графік залежності рівня ізоляції портів від частоти

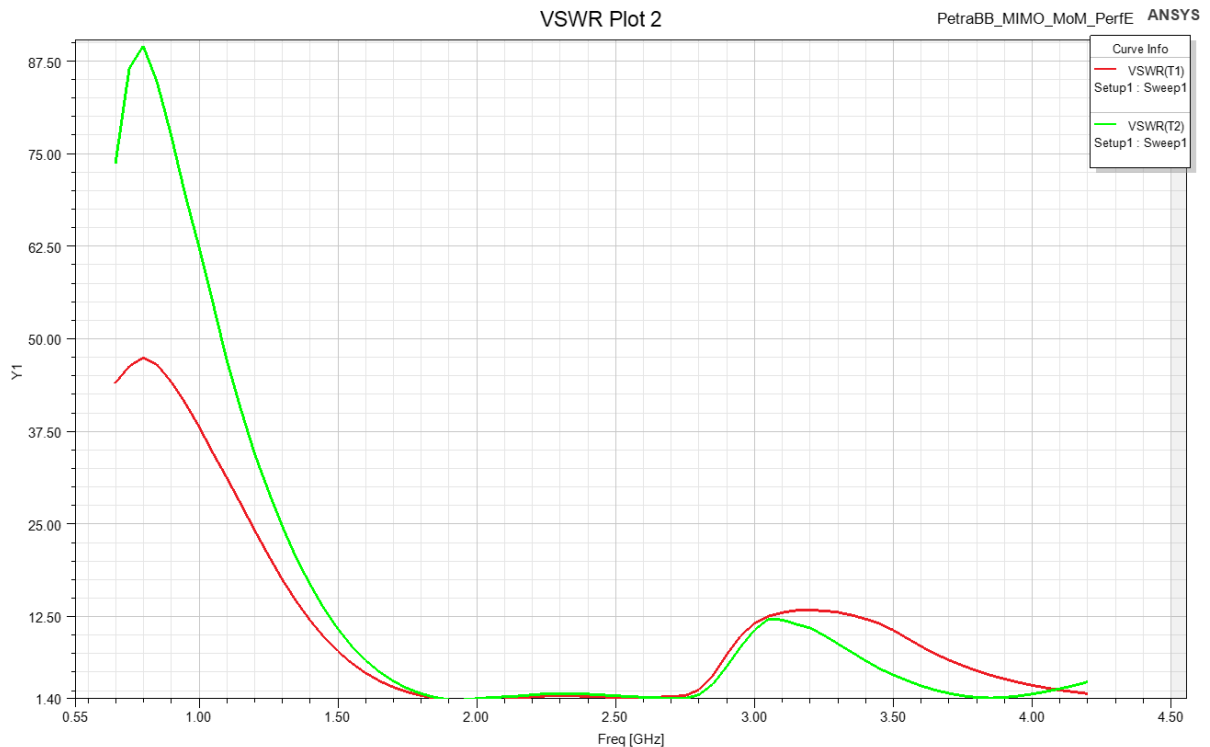


Рисунок 2.4 – Графік залежності КСХ від частоти для 2 портів антени

Як можна побачити з таблиць та графіків, антена має прийнятні рівні підсилення та достатньо малий рівень КСХ у діапазоні 1700-2700 МГц. Вище, та нижче цих частот відбувається дуже різкий стрибок рівня КСХ (що є зовсім не прийнятним для роботи обладнання) та падіння рівня підсилення, що також негативно вплине на роботу обладнання.

Коефіцієнти підсилення на частотах вивантаження (uplink) для відповідних діапазонів мають такі значення: 1750 МГц (1800) – 11.63дБ, 1950 МГц (2100) – 12.44 дБ, 2530 МГц (2600) – 15.05 дБ.

Тому можна зробити висновок, що антена має такі діапазони роботи як: LTE 1800, LTE 2100, LTE 2300, LTE 2600.

2.2 Оптимізація розміру рефлектора

Після оцінки робочого діапазону антени можна перейти до оптимізації різноманітних параметрів, розпочати можна з прорахунку впливу рефлектора

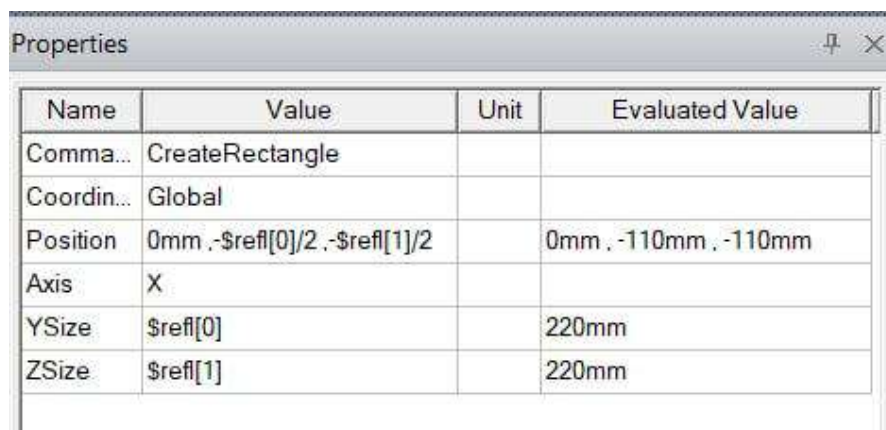
на коефіцієнт підсилення та діаграму направленості, яка є дуже актуальною у мережах четвертого покоління, адже всі базові станції працюють на одній і тій же частоті, тому захоплюючи сигнали з декількох станцій отримаємо значне зниження рівня SINR (відношення рівня сигналу до рівня шуму), що в свою чергу негативно вплине на швидкість.

Досліджувана антена має рефлектор висотою та шириною рівною 192 мм, перевіримо чи можливо зменшити його розміри не жертвуючи характеристиками, та чи дасть якийсь ефект збільшення його розмірів.

Намалювати та потім змінювати геометрію антени можна двома способами:

а) вручну вибрати фігуру, задати мишкою її розміри, поставили її де потрібно та задати параметри, цей спосіб є дуже простим але не ефективним, можна постійно робити багато помилок і шукати їх дуже важко, бажано не використовувати цей варіант у серйозних проектах;

б) задавати усі розміри та місця розташування елементів через формули які вказуються у властивостях цих фігур (рис.2.5).



Name	Value	Unit	Evaluated Value
Comma...	CreateRectangle		
Coordin...	Global		
Position	0mm ,-\$refl[0]/2 ,-\$refl[1]/2		0mm , -110mm , -110mm
Axis	X		
YSize	\$refl[0]		220mm
ZSize	\$refl[1]		220mm

Рисунок 2.5 – Приклад використання методу

Цей метод дозволяє вирішити 3 задачі, а саме:

– легко перевіряти модель на відсутність помилок при складанні моделі. Якщо навмисно змінити розмір якої небуť моделі в сторону

У цьому вікні натискаємо кнопку Add, та вводимо наступні параметри, натискаємо кнопку ОК (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Параметри нової змінної

Далі треба задати рефлектору нашу нову змінну. Для цього ідемо по шляху як показано на рисунку 2.8.

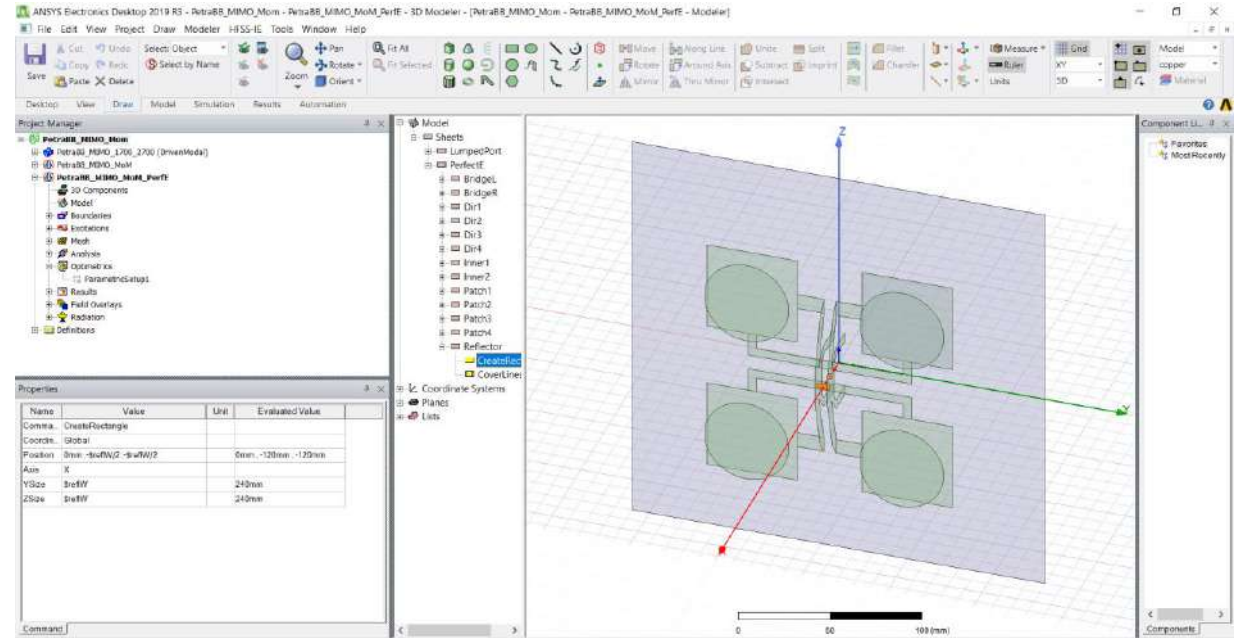


Рисунок 2.8 – Шлях до потрібної фігури

Нажимаємо 2 рази по першому пункту, який виділено синім кольором на рисунку 2.9, відкриється вікно.

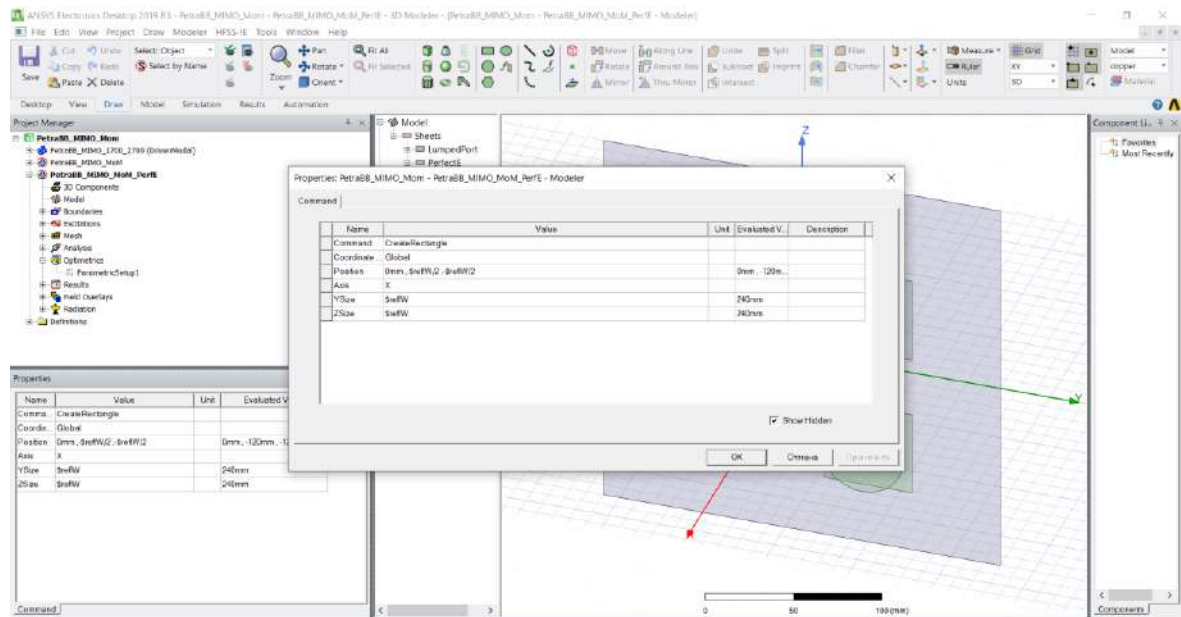


Рисунок 2.9 – Параметри фігури рефлектор

У цьому вікні задаємо параметри як на рисунку 2.9 та зберігаємо натискаючи кнопку ОК.

Тепер перейдемо знову до нашого проекту, зліва знайдемо пункт «Optimetrics», натискаємо правою кнопкою миші по цьому пункту та вибираємо те що показано на рисунку 2.10.

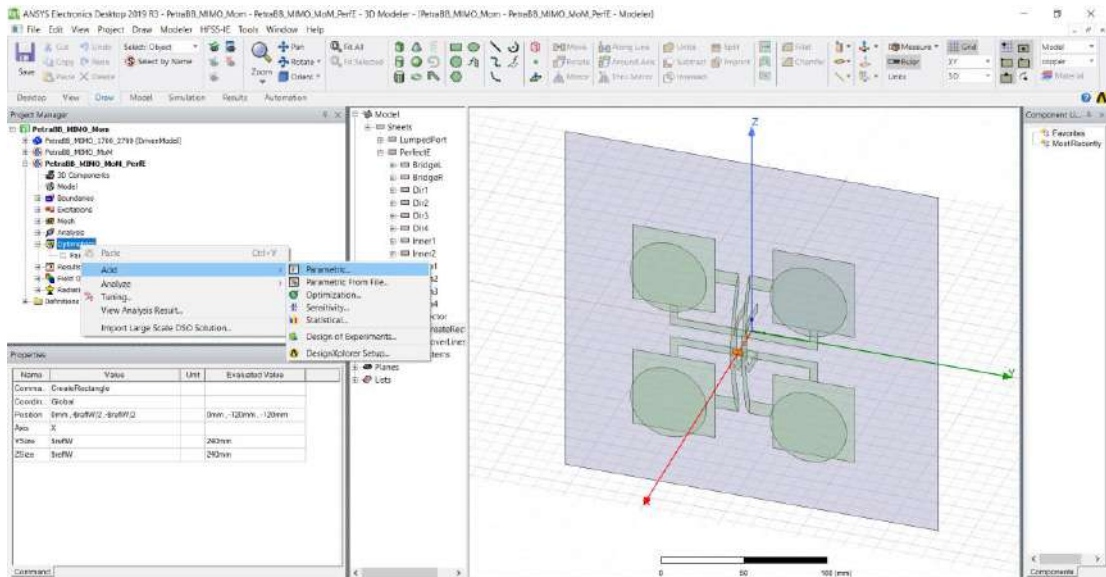


Рисунок 2.10 – Меню додавання нової задачі оптимізації

Після цього відкриється нове вікно де треба натиснути кнопку Add, вибрати змінну яку ми створили раніше з випадаючого списку. Далі треба задати нижню та верхню межу перебору розміру рефлектора, його крок, потім натиснути кнопку Add, та ОК. Детальніше можна побачити на рисунку 2.11.

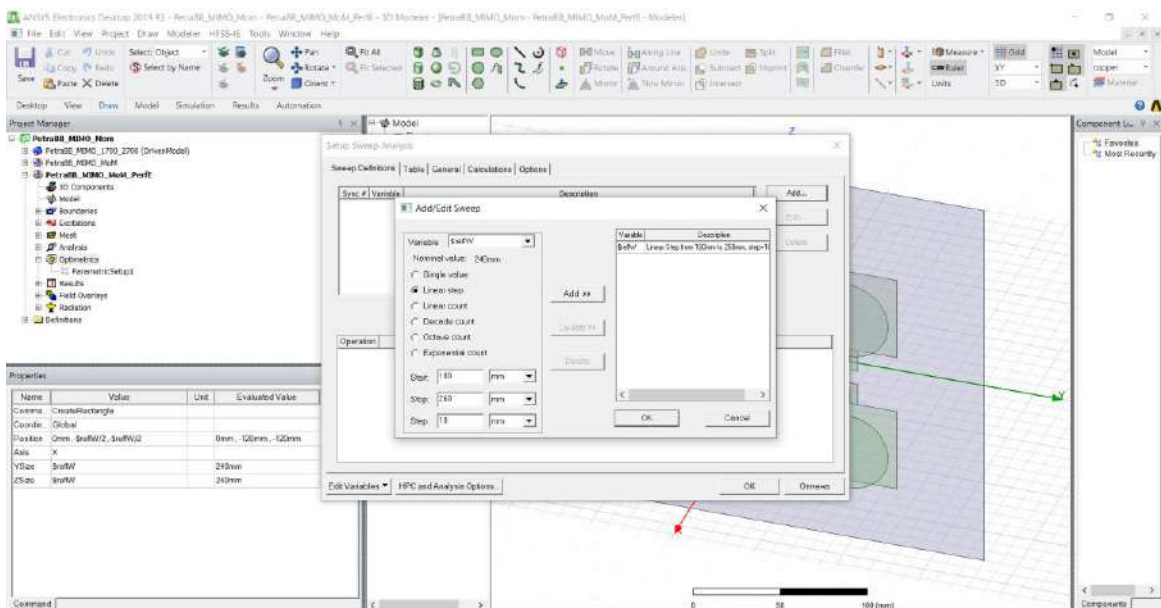


Рисунок 2.11 – Налаштування параметрів для функції Optimetrics

Потім переходимо у вкладку Options та вибираємо пункт Save Fields and Mesh як показано на рисунку 2.12 та натискаємо OK.

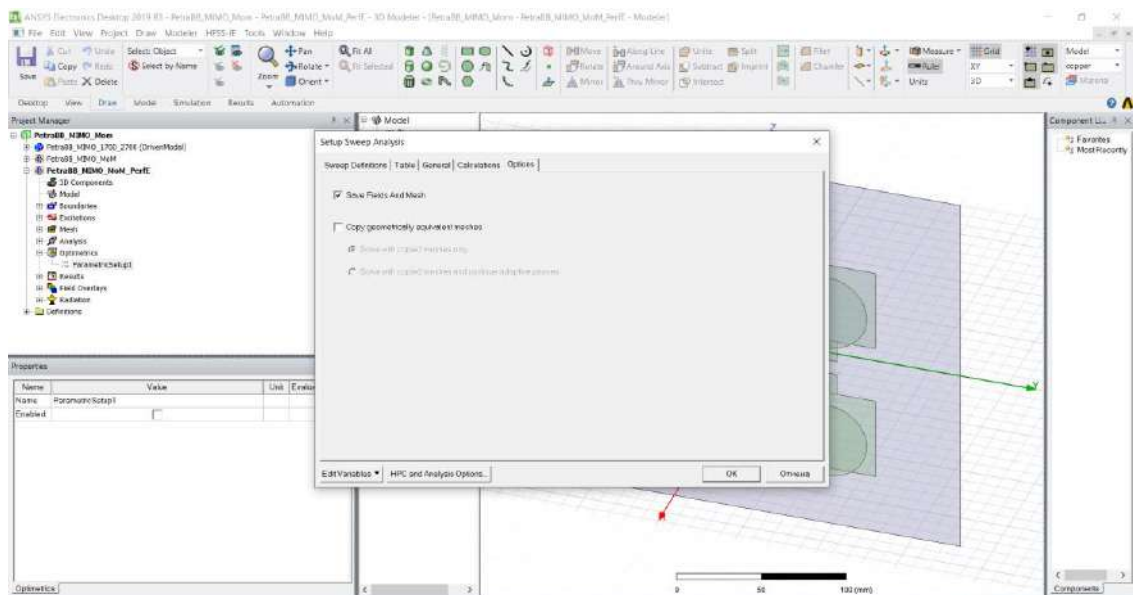


Рисунок 2.12 – Вибір потрібного пункту

Тепер якщо розвернути меню Optimetrics там буде новий пункт «ParametricSetup1». Щоб запустити розрахунок натискаємо на Optimetrics правою кнопкою миші і вибираємо пункт Analyze – All як показано на рисунку 2.13.

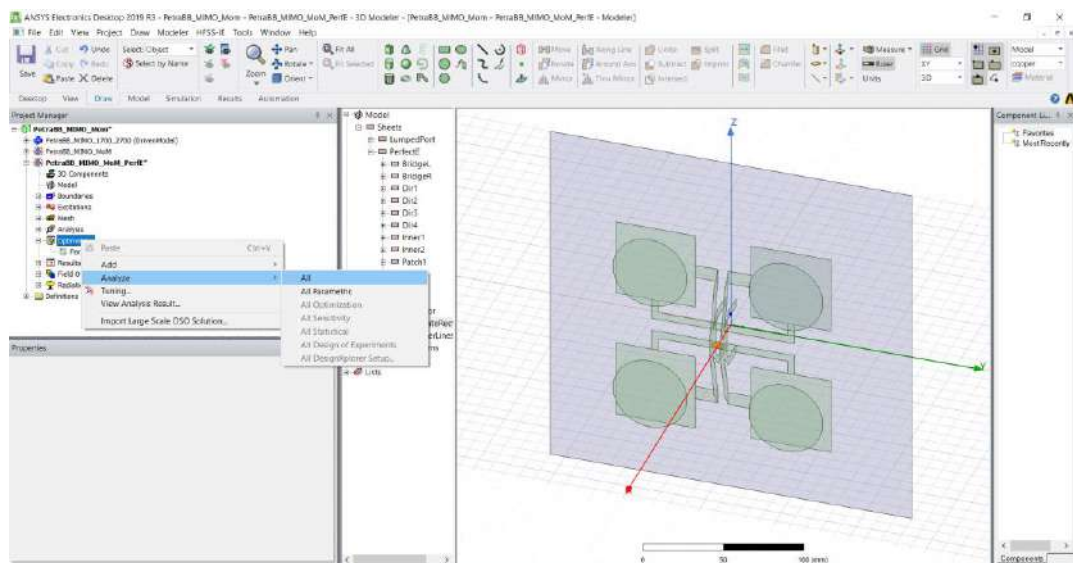


Рисунок 2.13 – Запуск процесу аналізу

Але, перед аналізом краще зробити деякі налаштування, адже для розрахунку графіків буде зроблено аж 8 повних розрахунків антени зі зміною розміру рефлектора на 10мм, як вказували раніше на рисунку 2.11. Зверху у меню знаходимо меню Tools, далі вибираємо Options і потім General Options, відкриється вікно де ми вказуємо кількість ядер процесора яку ми хочемо виділити для розрахунків, це треба вказувати для кожного Design Type з випадаючого меню (рис. 2.14).

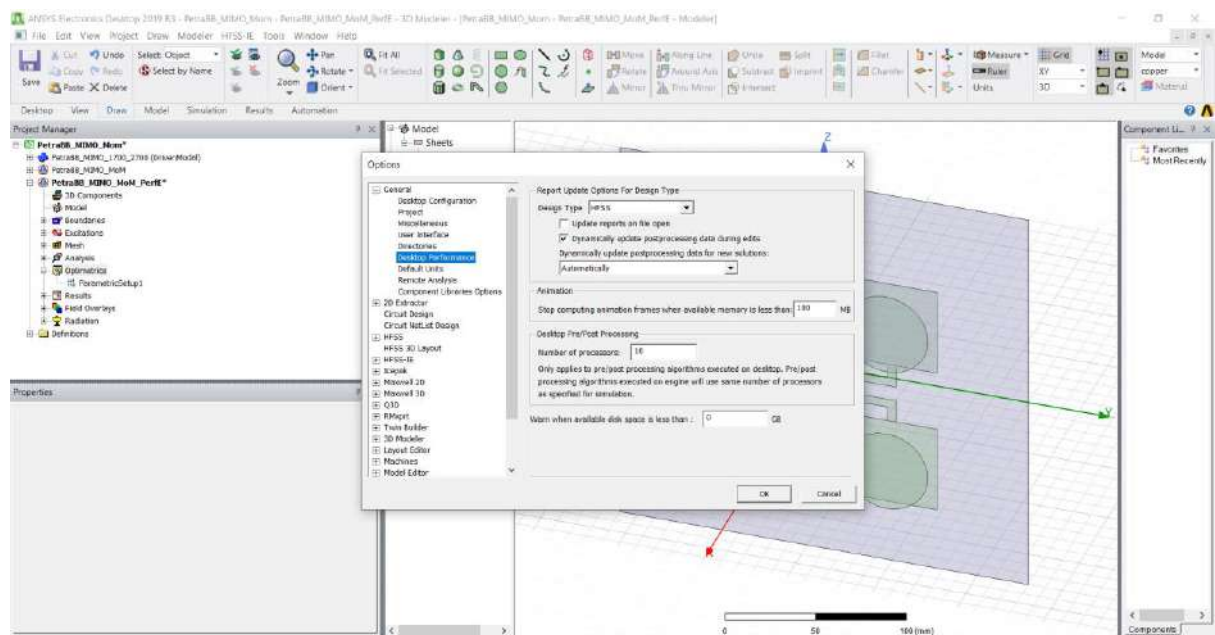


Рисунок 2.14 – Вікно налаштувань

Закриваємо це вікно, знову ідемо у Tools-Options але тепер вибираємо наступний пункт, відкриється вікно де треба перейти на вкладку Options та знайти пункт Default Process Priority та вибрати для нього варіант Below Normal, як показано на рисунку 2.15, та натиснути ОК.

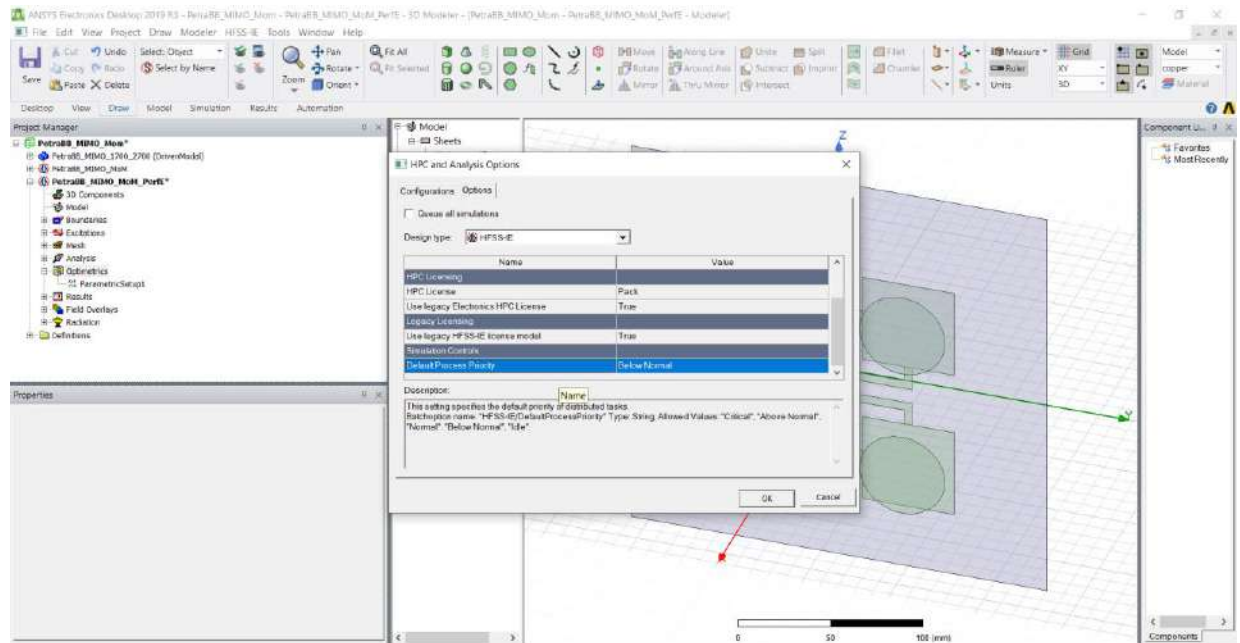


Рисунок 2.15 – Налаштування пріоритету Ansys HFSS

Далі запускаємо аналіз та чекаємо на розрахунок, отримані данні можна побачити нижче на рисунку 2.16.

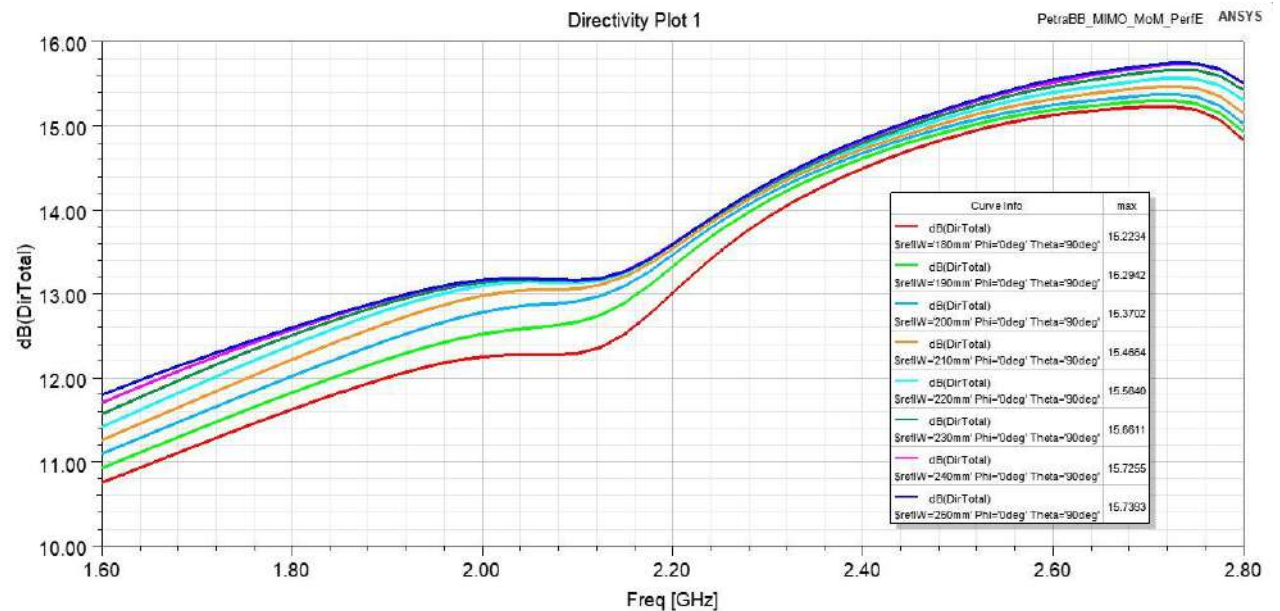


Рисунок 2.16 – Графік залежності підсилення антени від частоти для різних розмірів рефлектора

На рисунку 2.16 можна побачити, що розмір рефлектора у антені не є оптимальним для максимального рівня підсилення. На частоті вивантаження (uplink), діапазону 1800, різниця порівняно з рефлектором довжиною та шириною 240мм складає більше децибела, що в складних умовах прийому може підвищити швидкість та стабільність передачі інформації, оскільки слабим місцем завжди є канал передачі від абонента до вежі мобільного оператора.

Збільшення рефлектора на більш ніж 240 мм не дає майже ніяких змін, тому далі збільшувати габарити та собівартість немає ніякого сенсу. Всі наступні досліді будемо проводити з розмірами рефлектора 240 мм.

Коефіцієнти підсилення на частотах вивантаження (uplink) для відповідних діапазонів мають такі значення: 1750 МГц (1800) – 12.39 дБ (+0.76) 1950 МГц (2100) – 13.08 дБ (+0.64), 2530 МГц (2600) – 15.33 дБ (+0.28).

Коефіцієнти підсилення на частотах завантаження (downlink) для відповідних діапазонів мають такі значення: 1840 МГц (1800) – 12.72 дБ (+0.7), 2140 МГц (2100) – 13.23 дБ (+0.36), 2655 МГц (2600) – 15.62 дБ (+0.37).

Проведемо порівняння діаграми направленості для рефлектора 190 мм та 240 мм, щоб наочно побачити чому його зменшення негативно впливає не тільки на коефіцієнт підсилення, а і на інші не менш важливі параметри, результати можна побачити нижче на рисунках 2.17-2.20.

З рисунку 2.17 можемо побачити, що зменшуючи рефлектор збільшуються небажані бічні та задній пелюстки, а у прямому напрямку навпаки зменшується. Як було сказано вище, це негативно відобразиться на рівні SINR, що досить суттєво вплине на швидкість у складних умовах приймання сигналу.

На графіку КСХ (рисунок 2.18) бачимо, що розмір рефлектора не впливає на узгодженість антени.

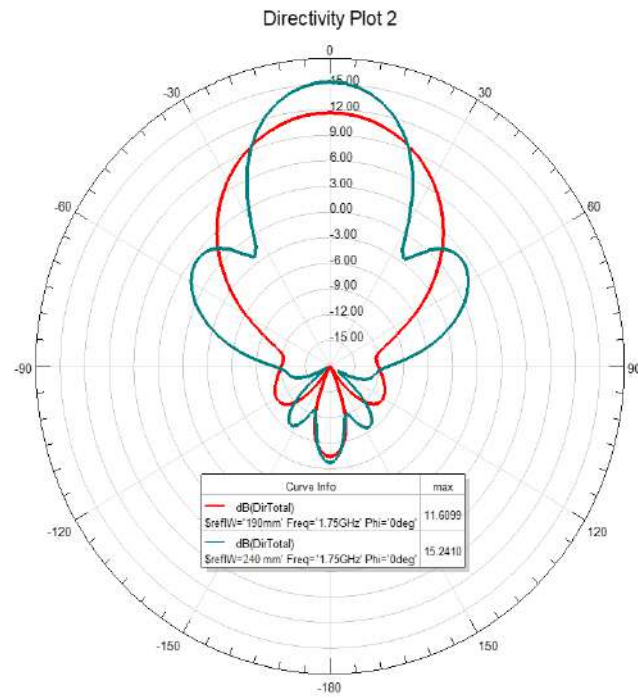


Рисунок 2.17 – Діаграма спрямованості антени з рефлектором 190мм та 240мм

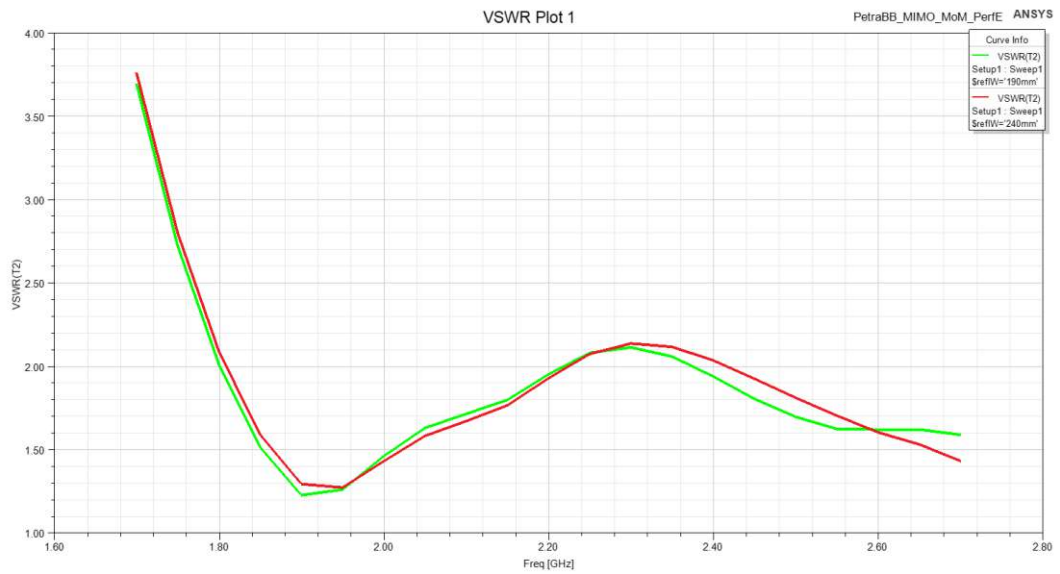


Рисунок 2.18 – Графік КСХ для рефлектора 190 (зелений графік) та 240 міліметрів (червоний графік)

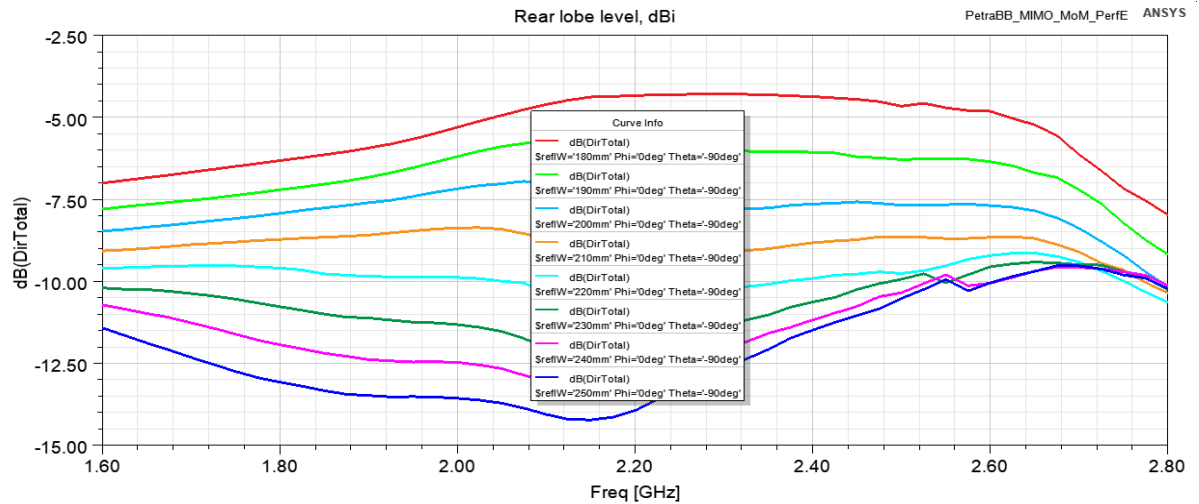


Рисунок 2.19 – Графік залежності підсилення від частоти по вертикалі (земля – небо)

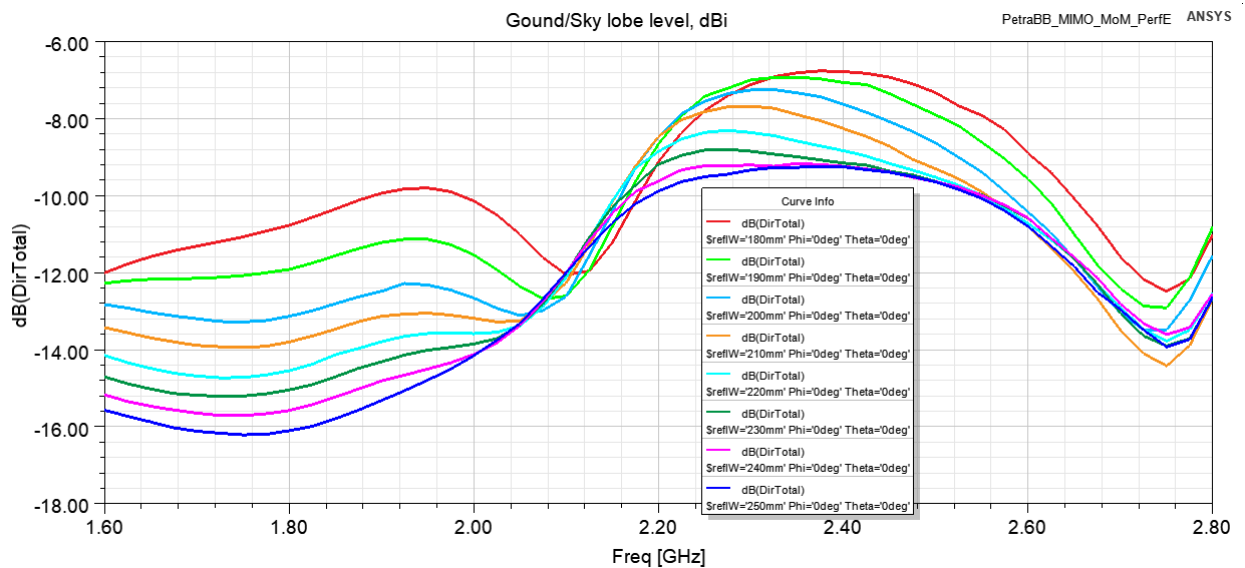


Рисунок 2.20 – Графік співвідношення підсилення у прямому та зворотному напрямку

Вплив зменшеного рефлектора на коефіцієнт підсилення є помірним, проте істотним. Хоча 1 дБ різниці на перший погляд це невелика різниця, проте слід пам'ятати, що для досягнення 2-2.5 дБ приросту необхідно

виготовити в 2 рази крупнішу і в 2 рази дорожчу антену. 1 дБ різниці лише за рахунок кількох сантиметрів плоского рефлектора це дуже рентабельна інвестиція.

Більш істотний вплив рефлектор дає на завадозахищеність антени – КЗД (коефіцієнт захисної дії). Різко зростає рівень як заднього пелюстка випромінювання, так і рівні випромінювання вверх/вниз вздовж щогли. Рівень Front/Back змінюється більше як на 6 дБ (понад 4 рази), рівень небажаного випромінювання вздовж щогли змінюється на стільки ж (рисунок 2.19).

Завадозахищеність антен для LTE модемів та для GSM репітерів дуже важлива з ряду міркувань:

а) в мережах LTE, зазвичай, в зону видимості попадають одночасно декілька базових станцій, що спричиняє низький SINR та різке зниження каналної швидкості. Ослаблення небажаних сигналів з задньої напівсфери може дати більший вплив на каналну швидкість передачі даних ніж нарощення основного підсилення антени;

б) при монтажі антен поблизу дахів, на фасади, на балкони – на антену діють як прямий сигнал від базової станції так і відбиті від будівель і споруд сигнали. Це негативне явище називається багатопроменевий прийом (multi-path propagation) який знижує рівень параметру сигнал/шум (SINR), оскільки відбиті сигнали з затримкою накладаються на основний сигнал і при високих порядках модуляції QAM можуть різко погіршувати % BER (Bit Error Rate) декодера;

в) антени, в яких сильніше випромінювання задньої напівсфери більш чутливі до предметів позаду себе (фасади, щогли, дахи), в них сильніше погіршується графік КСХ, міжпортова розв'язка, крос-поляризаційна розв'язка;

г) для GSM репітерів критично важливий параметр який впливає на допустиме підсилення системи – розв'язка між донорною (даховою) та сервісною (кімнатною) антенами. Як правило приміщення зони обслуговування стараються розташовувати позаду донорної (дахової антени).

Чим сильніше подавлене випромінювання вздовж щогли і в задню напівсферу – тим менші паразитні наведені поля на сервісну (кімнатну) антену.

З модальних характеристик антени, які можна отримати з такої моделі методом моментів (МоМ), інтерес представляє лише міжпортова ізоляція $S_{1,2}$. На цьому етапі вона показує потенціал конструкції по розв'язці портів в самих патчах та відсутності небажаного зв'язку між фазувальними лініями, в тому числі через спільний земляний полігон.

Отримана розв'язка дуже велика і перевищує чутливість методу МоМ для багатополісників, що сильно випромінюють (антени). Рівні паразитного випромінювання нижче -46...-60 дБ знаходяться на рівні дискретизаційного математичного шуму методу для сітки розбиття $\lambda/12$ та заданого рівня сходження моделі по $\Delta S < 2\%$, і свідчать про те, що на схемі антени поки що відсутні потенційні шляхи для ВЧ струмів з порту №1 на порт №2 і навпаки.

Така висока ізоляція не може бути отримана в класичних схемах патч-антен, в яких ортогональні порти живляться по лініях передачі даних з спільним земляним полігоном.

Продемонструємо яку міжпорову розв'язку можна досягти, якщо живлення окремих патчів здійснювати несиметричною недиференціальною лінією, а традиційною смуговою лінією.

Для цього створимо спрощену модель антени, взагалі без жодних фазувальних ліній, а зосереджені порти назначимо однією точкою на край патча, а іншою на спільний земляний полігон. Збудження подамо попарно протифазне, оскільки окремі елементи фазованої решітки розвернуті між собою на 180 градусів, а не розташовані одноманітно, як в класичних ФАР. Заодно такий експеримент покаже модальні характеристики окремо взятого патча (елемента решітки), зокрема нас цікавить матриця R/jX (активна частина імпедансу та реактивний опір антени). Результати можна побачити на рисунках 2.21-2.22.

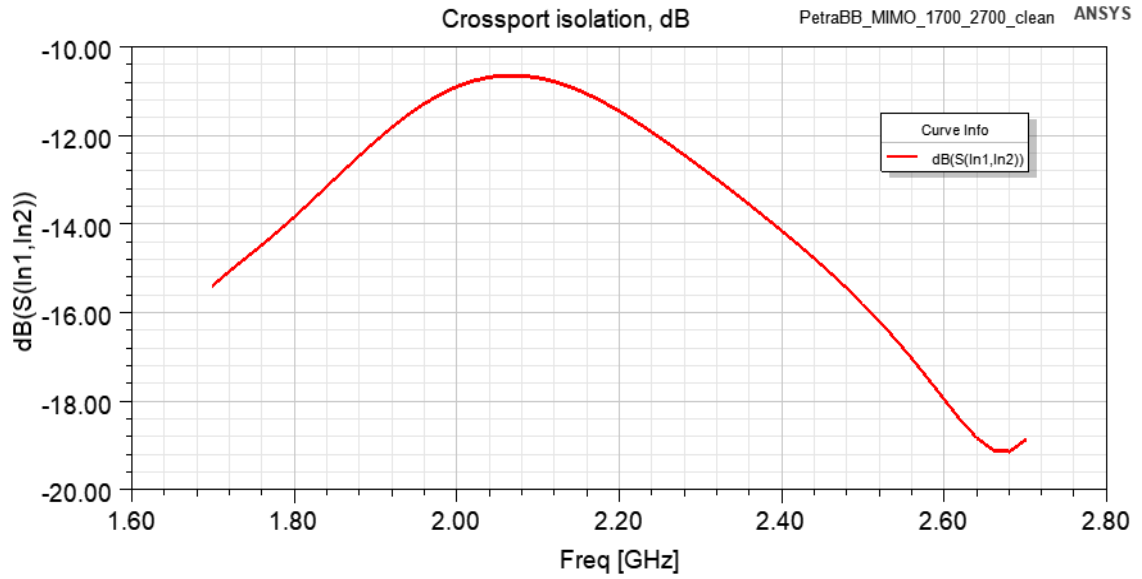


Рисунок 2.21 – Отримана міжпортова ізоляція

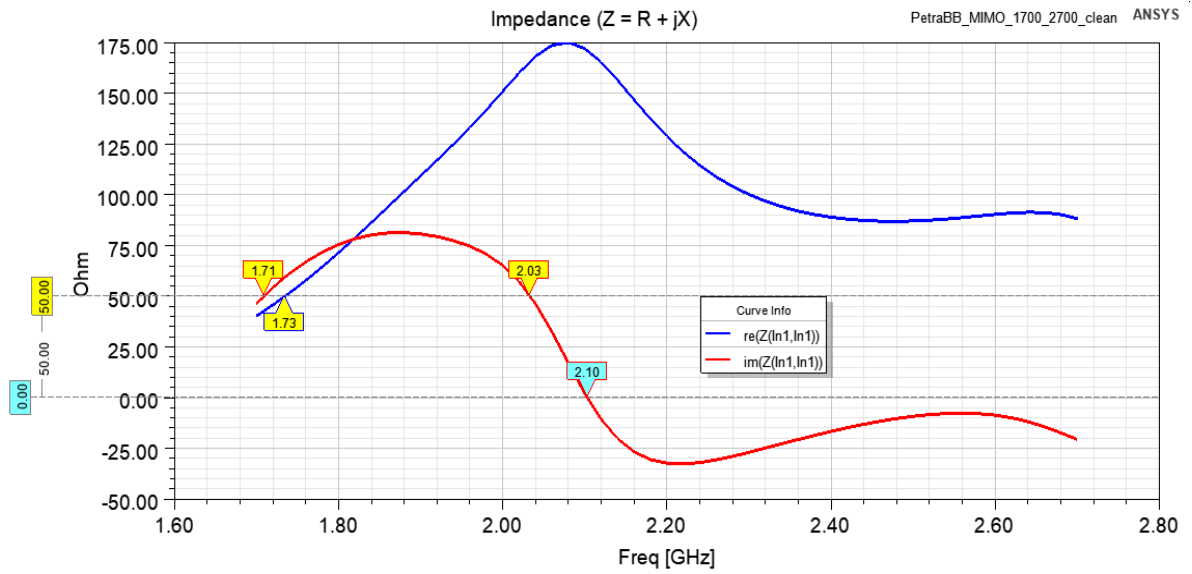


Рисунок 2.22 – Графік імпедансу ($Z=R+jX$)

За рахунок того, що струми живлення різних портів мають спільний земляний полігон, розв'язка невисока і на деяких частотах падає нижче критичного рівня, до -10 dB.

Унікальність конструкції розглядаємої антени в тому, що для живлення всіх 4 патчів в решітці розмірністю 2×2 використовуються диференціальні симетричні двопровідні лінії передачі. Якщо амплітуда сигналу на лініях однакова, а фази протифазні (зміщені рівно на 180° градусів), то така лінія не має паразитного випромінювання (є скомпенсованою), а по земляному полігону не протікають ніякі струми (синфазні струми).

За рахунок повного виключення землі з схеми роботи фазувальних ліній, міжпортова ізоляція така ж висока, як в ФАР на основі коаксіальних кабелів (які використовуються в професійних антенах базових станцій, ціною тисячі доларів). В той же час, немає теплових втрат притаманних кабелям, а точність і простота виготовлення вражають. Прецизійна обробка кабелів обходиться дуже дорого і займає дуже великі витрати людино-годин кваліфікованого персоналу, потребує дуже точної і зосередженої праці, як при роботі з ювелірними виробами, оптикою чи годинниковими механізмами. Точність же виготовлення даної антени типу «Petra» гарантується точністю лазерної різки металів комп'ютером.

Друга важлива властивість такої лінії – вона є трансформатором імпедансу. Довжина плеча такої лінії (від одного патча до центра, де буде розміщений балун та порт живлення) складає $89/2 = 44.5$ мм. Така повітряна лінія має властивості чверть хвильового трансформатора для довжини хвилі $44,5 \times 4 = 178$ мм, що відповідає частоті близько 1685 МГц. Робочий діапазон антени 1700-2700 МГц, іншими словами цей трансформатор має електричну довжину від 0,26 до 0,4 λ .

Виміряємо імпеданс диференціальної лінії передачі, яка використовується в оригіналі антени типу «Petra». Лінії виконані зі смуг металу шириною 5.0 мм, ко-планарний проміжок 3.0 мм, висота над reference ground 15 мм. Для цього скористаємося інструментом Ansys HFSS 2D Extractor, де намалюємо переріз нашої лінії передачі, вигляд якої можна побачити на рисунку 2.23.

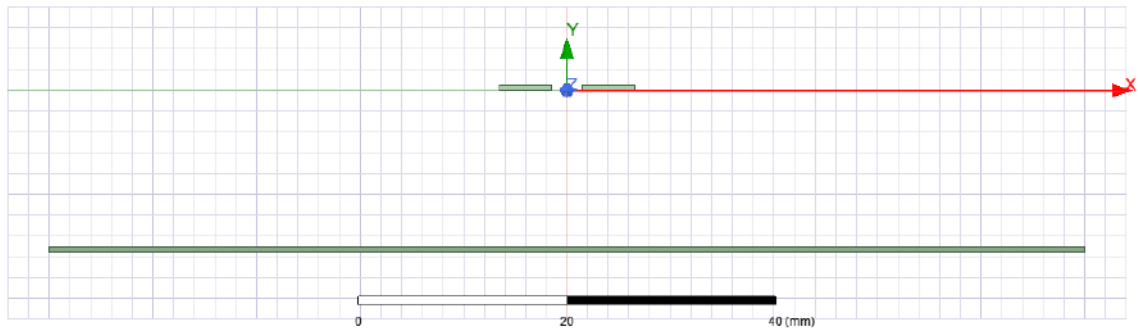


Рисунок 2.23 – Переріз лінії передачі

Виміряний імпеданс склав 179,7 Ом, або ж округлено 180 Ом.

Для того, щоб побачити як такий трансформатор взаємодіє з імпедансом патчів, створимо в Ansys Circuit Designer еквівалентну схему, та вирішимо її за допомогою Nexxim Solver.

Слід уточнити, що лінія має імпеданс 180 Ом саме диференційний, по 90 Ом на плече. Одне плече підключене до верхнього ряду антен, інше до нижнього. Для меншої похибки краще переробити модель на диференційне збудження “голих патчів”, без залучення reference ground. Але щоб зрозуміти який вплив дає четверть хвильовий трансформатор, достатньо буде і наявної моделі, яку можна побачити на рисунку 2.24.

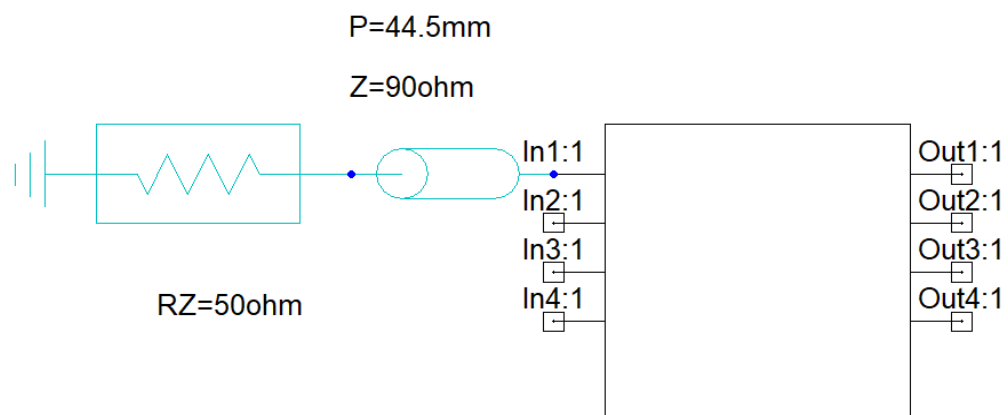


Рисунок 2.24 – Схема, що аналізували у Ansys Circuit Designer

Результат аналізу можна побачити на рисунку 2.25.

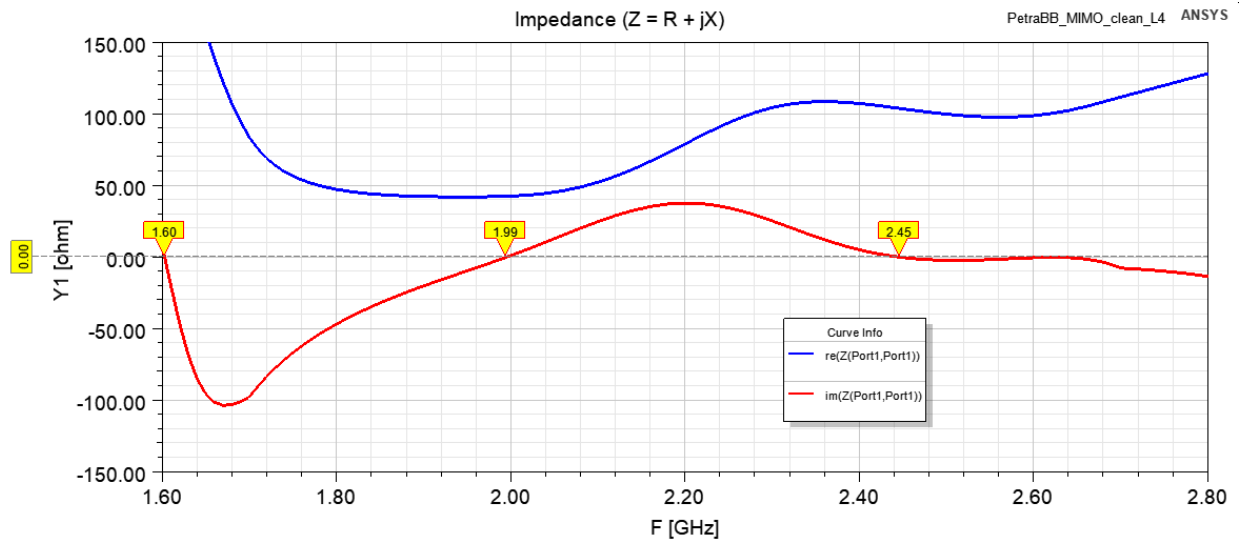


Рисунок 2.25 – Отриманий графік імпедансу

Порівняємо отримані графіки з графіком імпедансу в повній моделі антени зображеним на рисунку 2.26.

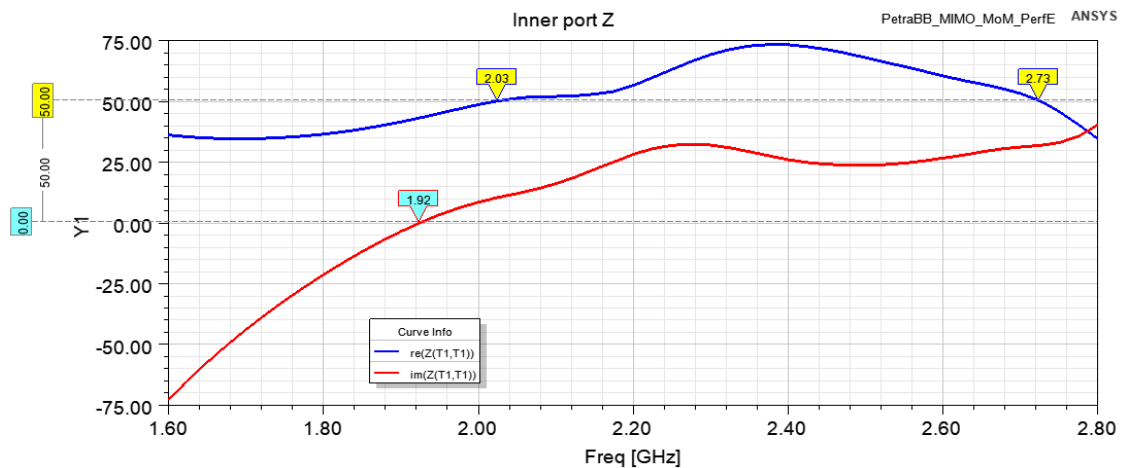


Рисунок 2.26 – Отриманий графік імпедансу

Характер руху кривих співпадає, на частотах трохи нижче 2 ГГц наступає резонанс, крива реактансу (реактивного опору) має висхідний

тренд, в діапазоні WiFi реактанс заломлюється вниз і далі коливається на одному рівні (ймовірно навколо нуля).

Графік активної частини імпедансу став дуже зручним. В голого диполя він мав дуже великі перепади, перший високоомний резонанс, другий низькоомний.

Після трансформації на “коромислах” графік Re коливається навколо невеликих оптимальних значень в районі 50-100 Ом (точні значення підбираються залежно від того яку ми антену хочемо отримати на виході – на 50 Ом, на 75 Ом, на 100 чи на 150 Ом. Варіюючи зазором між коромислами легко випускати великий асортимент антен – як на 50 так і на 75 Ом, як одиночних так і здвоєних, в яких $2 \times 100 = 50$ Ом, а $2 \times 150 = 75$ Ом

Фінальне узгодження антени з 50 Ом портом живлення буде відбуватися через балун Рутроф, який ми поки не аналізували в методі МоМ, оскільки модель буде занадто складна для обчислення на звичайних ПК. Моделювання балуна, коаксіального переходу та отримання S-параметрів всього виробу краще проводити за допомогою методу FEM.

2.3 Оптимізація відстані між сусідніми вібраторами та директорами

Після оптимізації розмірів рефлектора можна перейти до спроби покращення характеристик антени шляхом зміни відстані між сусідніми директорами та вібраторами. У наявної антени відстань дорівнює 85мм, спробуємо змінити відстань на $+$ та $-$ 5 мм, щоб побачити та порівняти отримані характеристики.

Не будемо використовувати функцію Optimetrics, спробуємо це зробити в ручному режимі з огляду на те, що вона не працює для масивів даних. Для зміни відстані між сусідніми вібраторами треба у змінних проекту натиснути лівою кнопкою миші два рази, знайти $\$phar$, натиснути на цей

пункт і натиснути кнопку Edit, далі потрібно змінити її розміри на потрібні як показано на рисунку 2.27 та натиснути OK і знову OK.

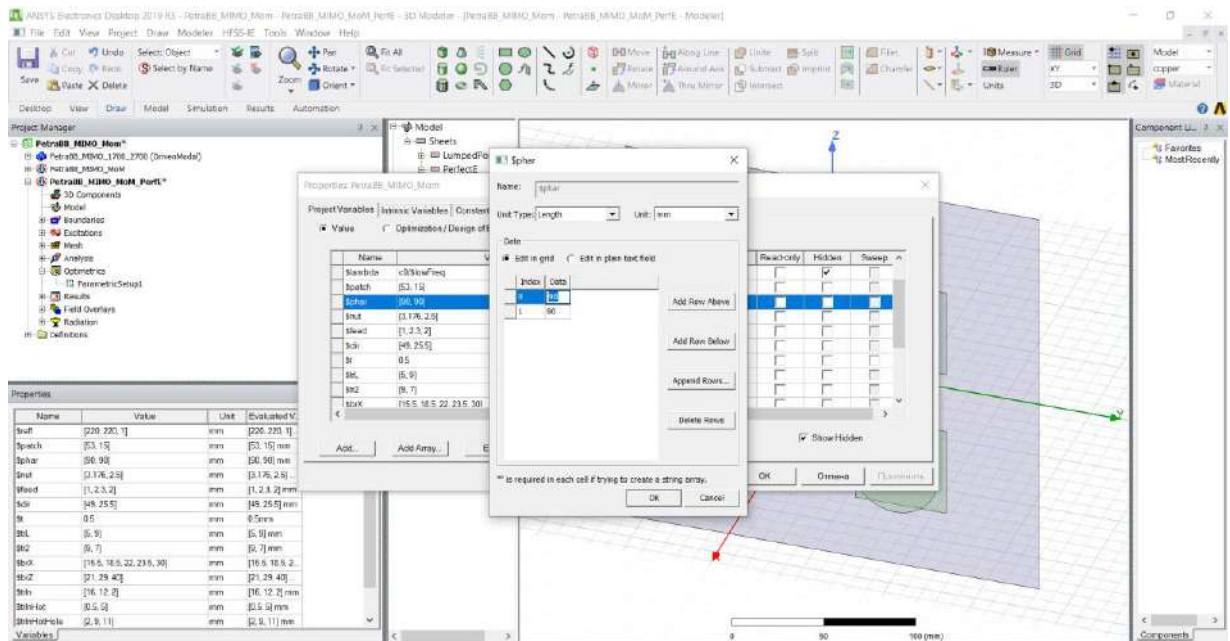


Рисунок 2.27 – Налаштування відстані між вібратором та директором

Загальний вигляд отриманої антени можна побачити на рисунку 2.28.

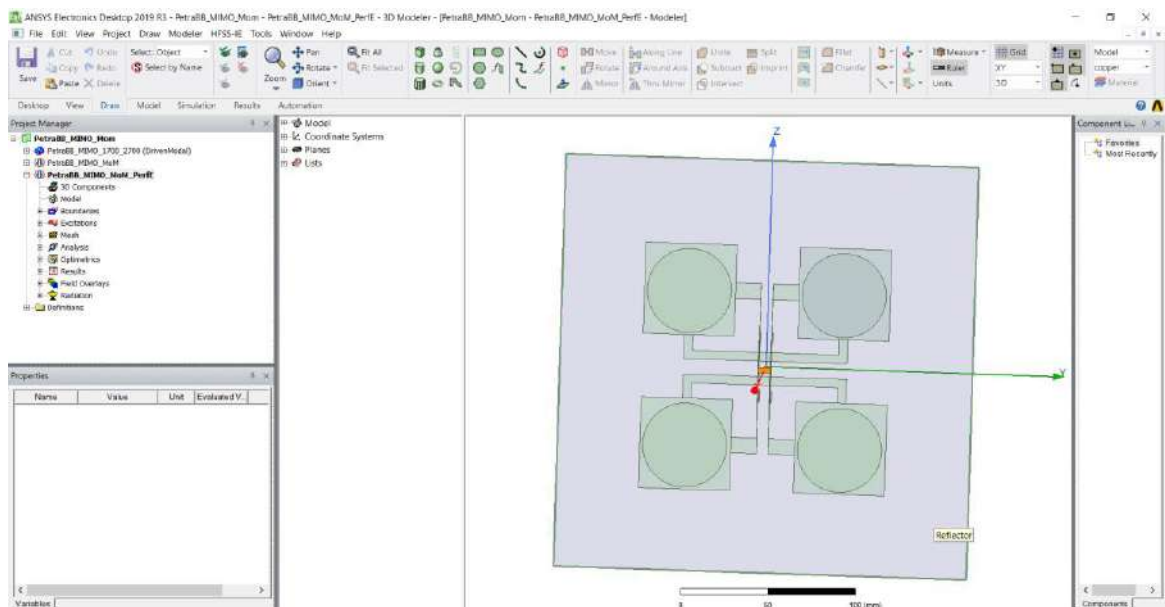


Рисунок 2.28 – Загальний вигляд антени у Ansys HFSS

Далі запускаємо аналіз, для цього зверху знаходимо меню HFSS-IE, а у ньому натискаємо *Analyze all*. Після розрахунків зберігаємо результати, повторюємо для іншого значення відстані. Отримані результати можна побачити нижче на рисунках 2.29-2.31.

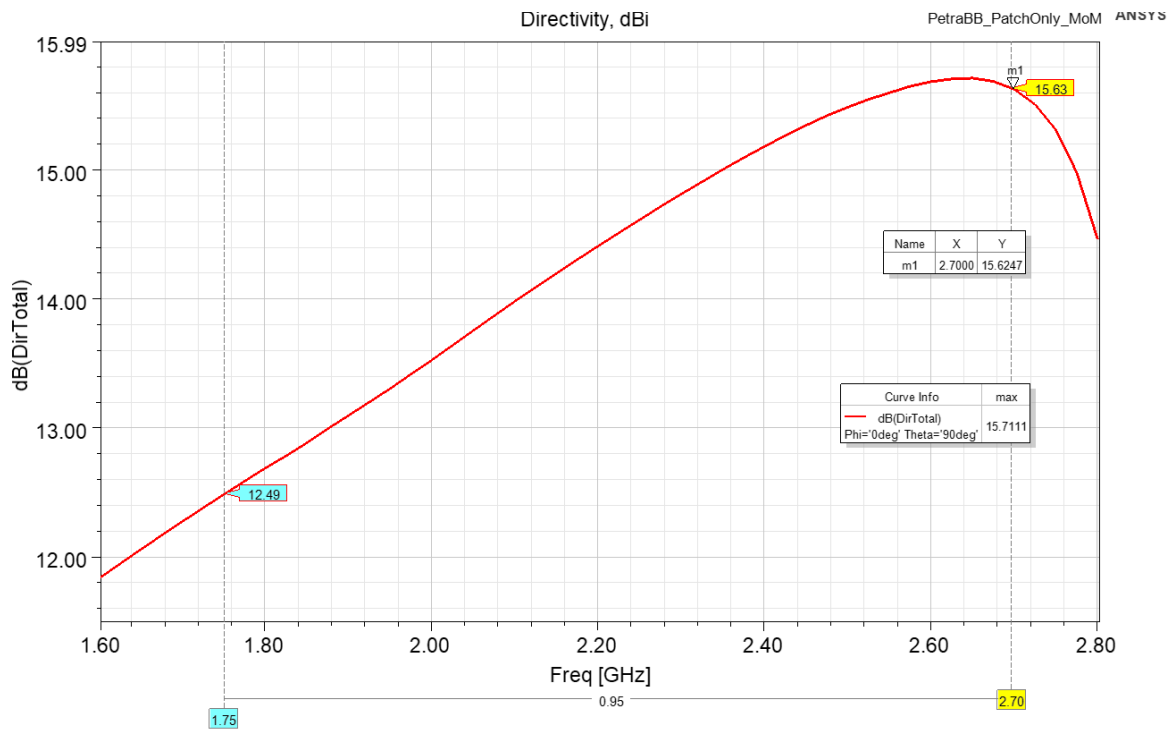


Рисунок 2.29 – Залежність коефіцієнту підсилення від частоти для відстані 90 мм

У даному випадку, коли відстань дорівнює 90мм, завал кривої починається раніше ніж 2700 МГц, що для нас є абсолютно неприйнятним через зменшення підсилення для частот діапазону 2600 МГц.

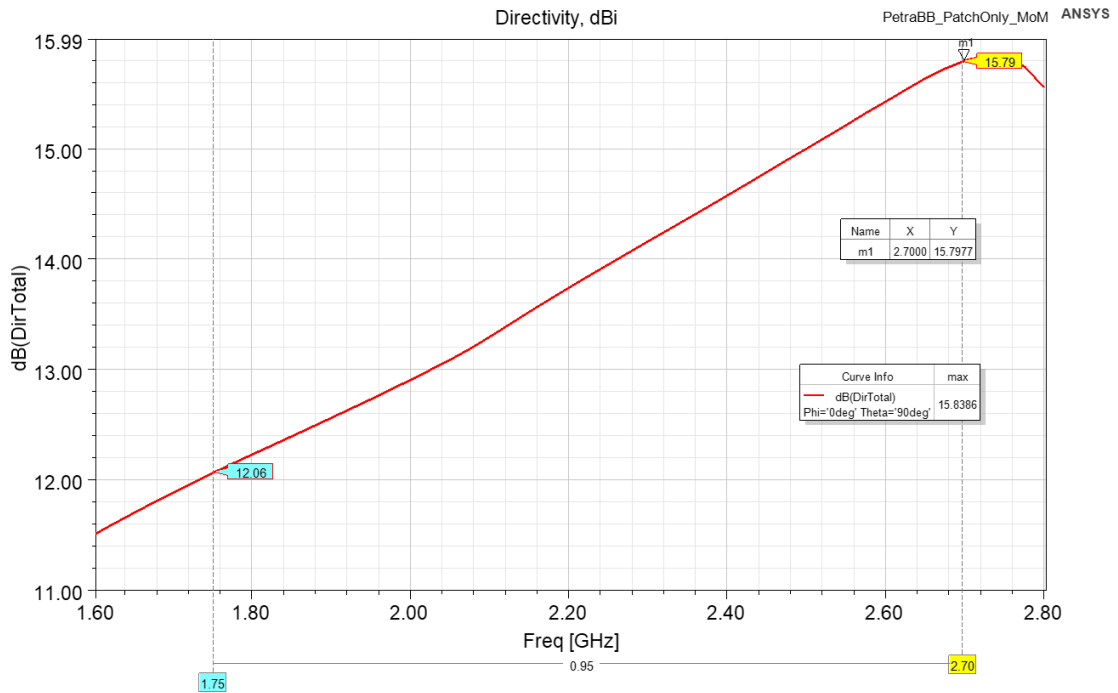


Рисунок 2.30 – Залежність підсилення від частоти для відстані 80 мм

При відстані у 80мм завал кривої підсилення стається приблизно на 2800 МГц і через це у діапазоні 2600 МГц є невеликий недобір підсилення.

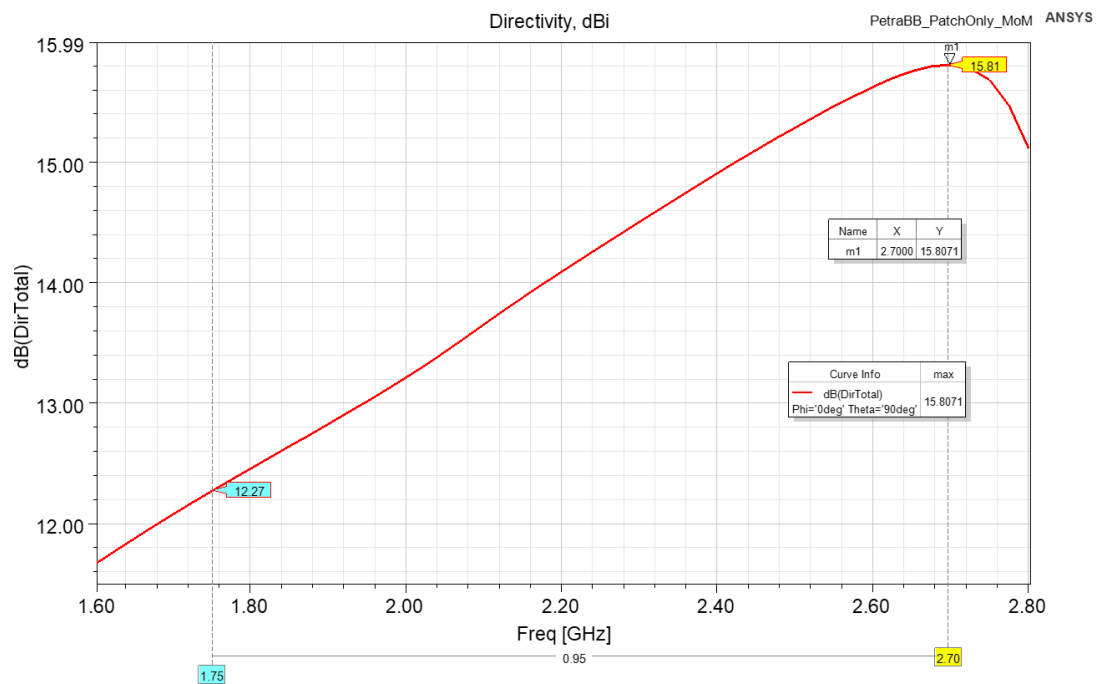


Рисунок 2.31 – Залежність підсилення від частоти для відстані 85 мм

Порівнюючи результати для відстаней у 80, 85 та 90 мм. можна прийти висновку, що відстань 85 мм є найоптимальнішим варіантом, якщо нам треба забезпечити прийнятну роботу антени у діапазонах частот від 1700 до 2700 МГц. Тобто цей варіант є найкращим у нашому випадку.

2.4 Оптимізація відстані між вібратором та директором

Після спроби добитися покращення характеристик антени шляхом зміни відстані між сусідніми вібраторами та директорами спробуємо змінити відстань від вібратора до директора.

У цьому випадку ми також можемо зіткнутися з проблемою неможливості використати інструменту «Optimetrics» для масиву. Але у цьому випадку можна використати єдиний варіант вирішення проблеми – для кожного елемента і його параметра створити окрему змінну, яка в свою чергу вже зможе бути оптимізована засобами HFSS. У випадку зміни відстані між вібратором та директором треба лише задати одну нову змінну та у параметрах першого директора замість змінної що була, вписати нову (інші директори зав’язані на перший та точно повторюють його параметри).

Як і у попередньому кроці створюємо нову змінну, задаємо їй стандартні параметри які можна побачити на рисунку 2.32.

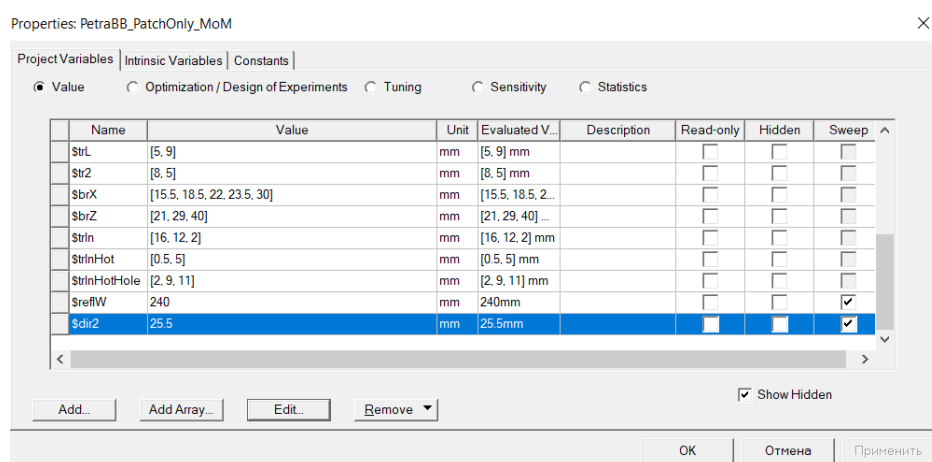


Рисунок 2.32 – Створення нової змінної \$dir2

Далі, як і раніше при зміні відстані між вібраторами та директорами створюємо нову задачу для Optimetrics, нашої нової змінної, задаємо параметри зміни відстані від 20ти до 30ти міліметрів з кроком 2 міліметри як показано на рисунку 2.33.

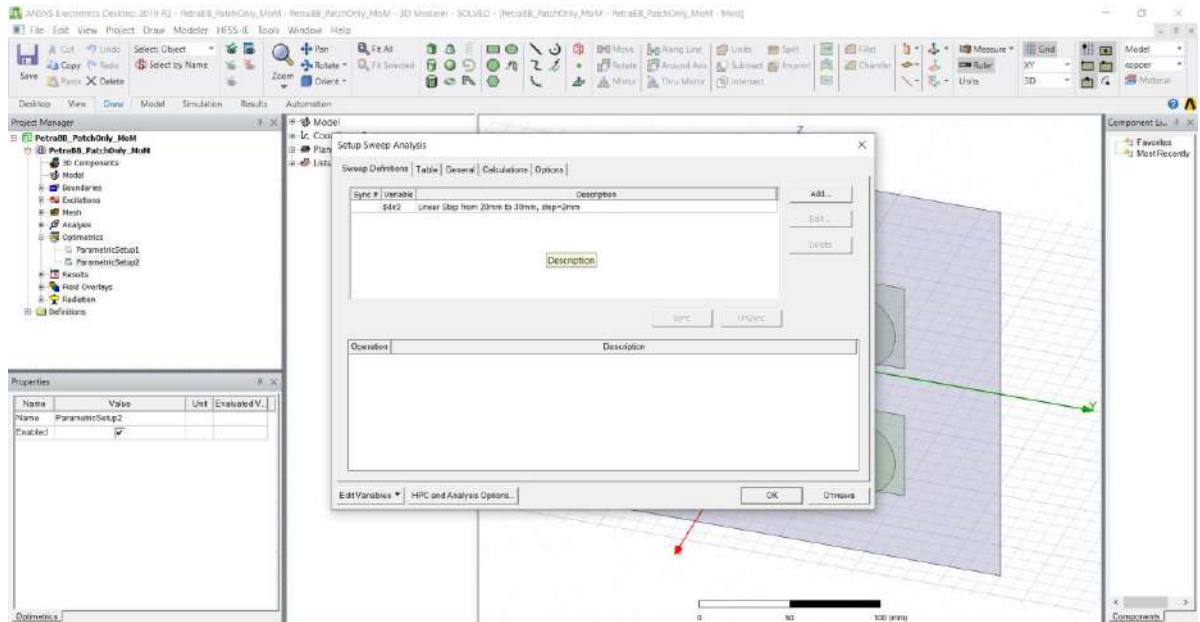


Рисунок 2.33 – Створення нової задачі для інструменту Optimetrics

Далі треба відкрити параметри об'єкту Dir1 та задати параметри як показано на рисунку 2.34.

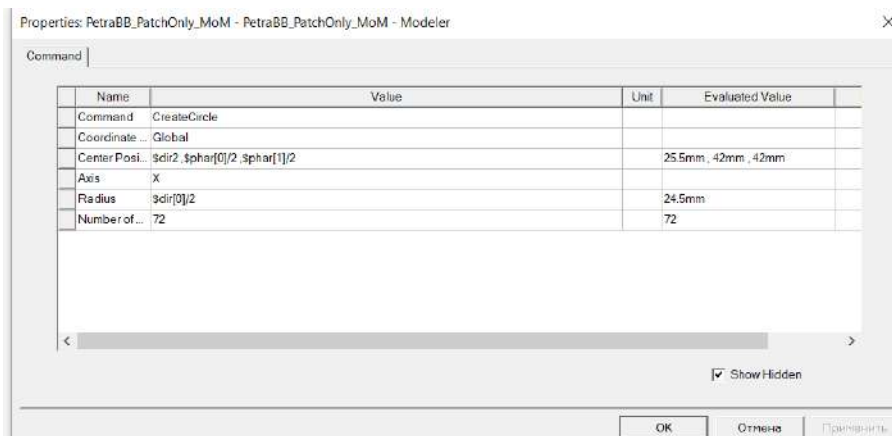


Рисунок 2.34 – Налаштування об'єкту Dir1

Далі запускаємо аналіз, для цього зверху знаходимо пункт меню HFSS-IE, а в ньому натискаємо Analyze all. Отримані данні можна побачити нижче на рисунках 2.35-2.37.

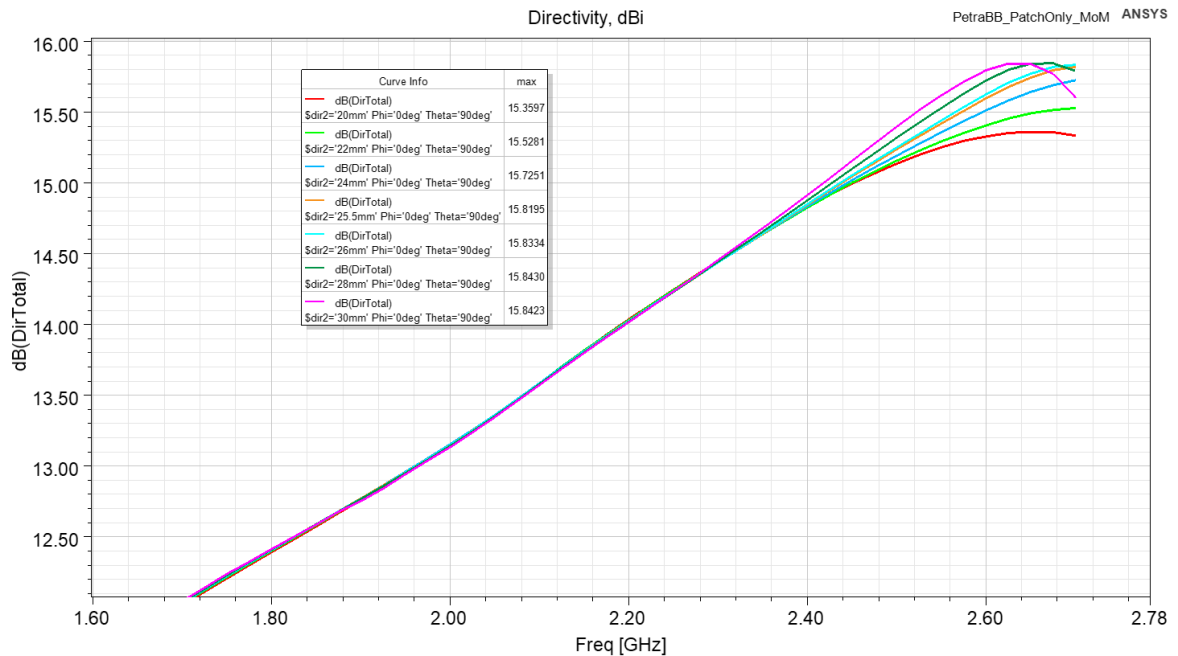


Рисунок 2.35 – Графік залежності коефіцієнту підсилення від частоти для різних відстаней від вібратора до директора

Як видно на графіку коефіцієнту підсилення (рисунок 2.35) для відстані 20-24 міліметри на частотах близьких до 2700 МГц відбувається недобір підсилення, що є неприйнятним. На відстані 28-30 міліметрів завал по підсиленню відбувається раніше потрібного порогу у 2700 МГц, що також не задовольняє поставлені нами умови. Відстань 25-26 мм є найоптимальнішою, дозволяє уникнути завал підсилення до 2700 МГц та дозволяє отримати найкращий максимальний рівень коефіцієнту підсилення.

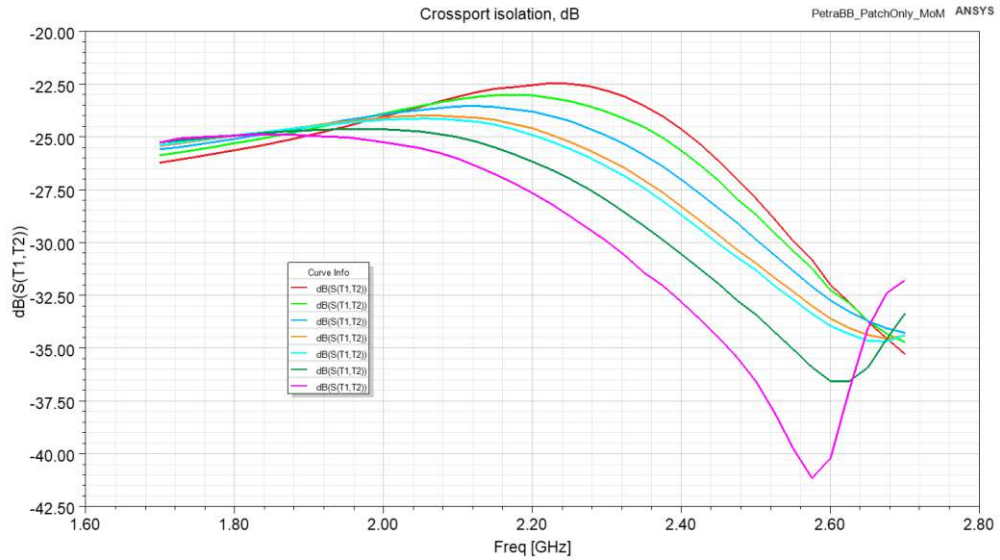


Рисунок 2.36 – Графік залежності рівня ізоляції портів від частоти для різних відстаней від вібратора до директора

На графіку ізоляції портів (рисунок 2.36) можна побачити, що відстань у 25-26 міліметрів також є найоптимальнішою, без різких завалів та недобору.

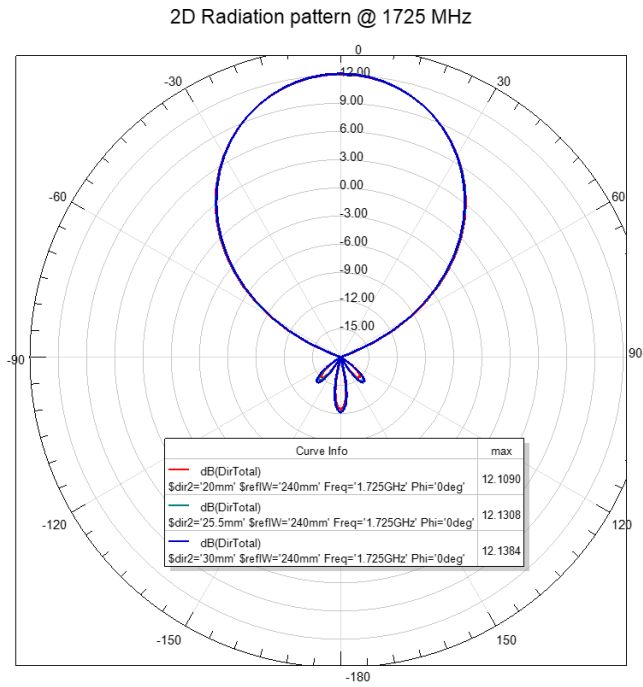


Рисунок 2.37 – ДН для відстаней у 20, 25, 30 мм

На діаграмі направленості (рисунок 2.37) можна побачити, що зміна відстані майже ніяк не впливає ні на бокові чи задні пелюстки, ні навіть на головну. Для відстані у 20-24мм є дуже невелике збільшення підсилення для задньої пелюстки, але воно дуже не значне та ним можна знехтувати.

Тому можна зробити висновок, що стандартна відстань для антени у 25 міліметрів є оптимальною та її можна не змінювати.

2.5 Покращення параметрів шляхом збільшення кількості директорів

Спробуємо додати ще по одному директору на пару до наявних, для цього можна просто скопіювати наявні та задати їм нові параметри. Після копіювання нам треба створити нову змінну яка буде відповідати за відстань від директора до рефлектора (щоб упростити задачу та не перелаштовувати все спочатку), що можна побачити на рисунку 2.38.

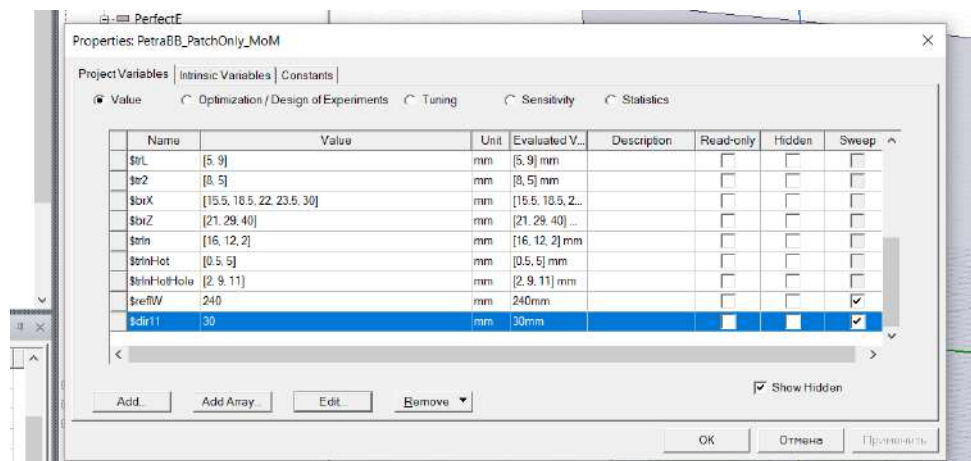


Рисунок 2.38 – Створення нової змінної

Після створення нової змінної у параметрах доданих директорів задамо цю змінну замість існуючої, що показано на рисунку 2.39.

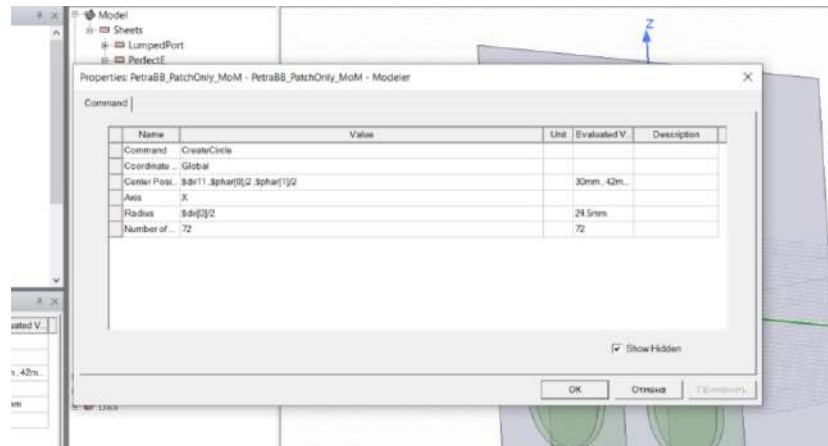


Рисунок 2.39 – Редагування параметрів нових директорів

Після задавання потрібних параметрів отримаємо антену з вісьмома директорами (рис. 2.40).

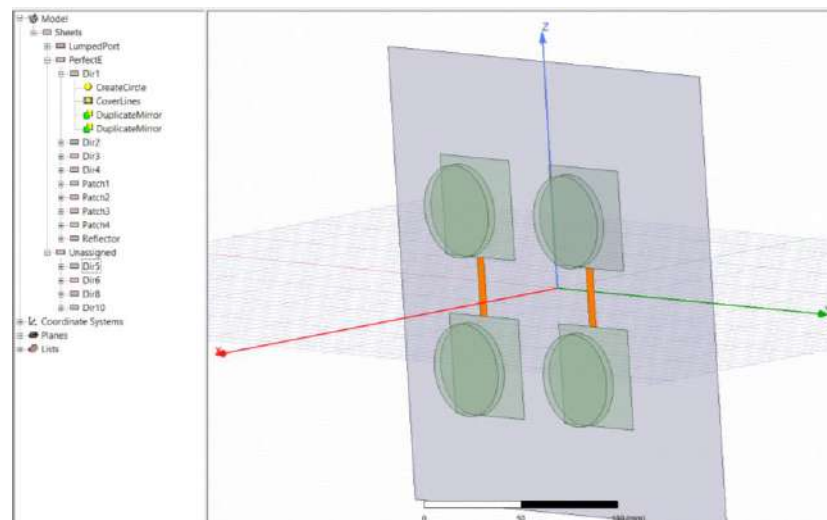


Рисунок 2.40 – Антена з доданими директорами

Далі як і у попередніх пунктах створюємо нове правило для Optimetrics для нашої нової змінної $\$dir11$ та задаємо діапазон прорахунку 30-60 міліметрів з кроком 5 міліметрів.

Отриманий результат можна побачити нижче на рисунках 2.41-2.42.

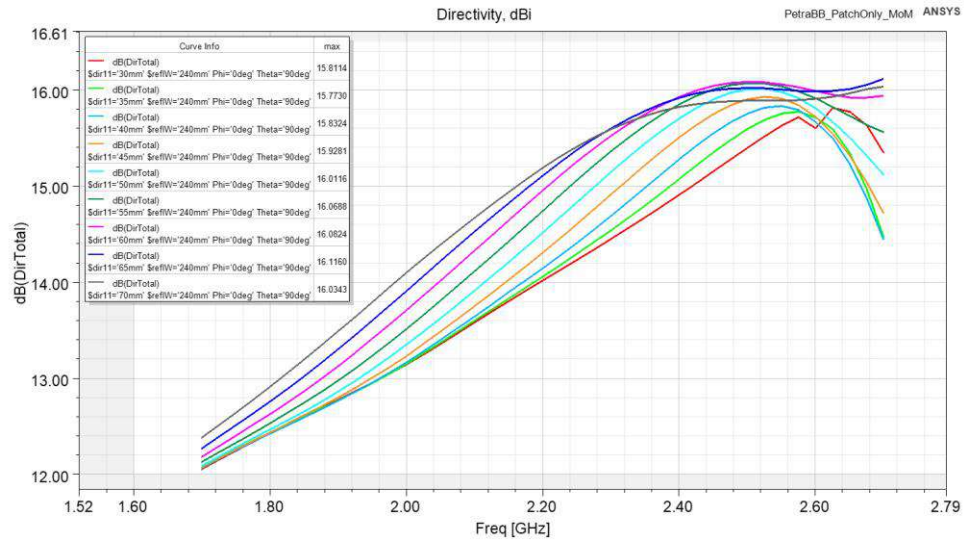


Рисунок 2.41 – Залежність коефіцієнту підсилення від частоти для різної відстані між першим та другим вібратором

Як можна побачити на рисунку 2.41 найоптимальнішим варіантом є відстань у 65 міліметрів до рефлектора (або 40 міліметрів до сусіднього вібратора). Коефіцієнт підсилення порівняно з варіантом без додавання другого ряду директорів виріс на дБ.

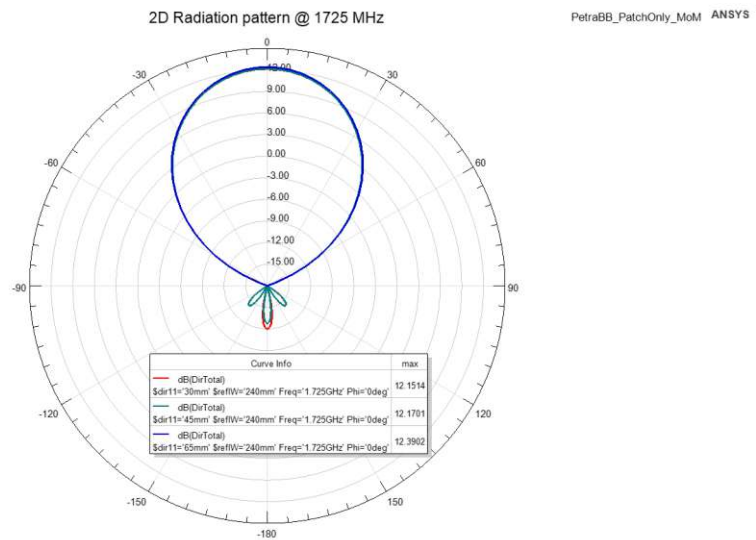


Рисунок 2.42 – ДН для відстаней у 30, 45, 65 міліметрів

Можна зробити висновок, що додавши другий ряд вібраторів отримали невелике покращення коефіцієнту підсилення, діаграма спрямованості не змінилася.

Подальше збільшення кількості директорів таким способом буде уже затратним у часі та не ефективним, тому візьмемо модель готової антени типу «хвильовий канал» під комерційною назвою «BDM2» та спробуємо взяти креслення її директорів та додати на нашу антену.

Для початку візьмемо 5 оптимізованих директорів з креслення «BDM2» та додамо їх на модель нашої антени яку дещо спростили для перевірки працездатності, результат можна побачити на рисунку 2.43.

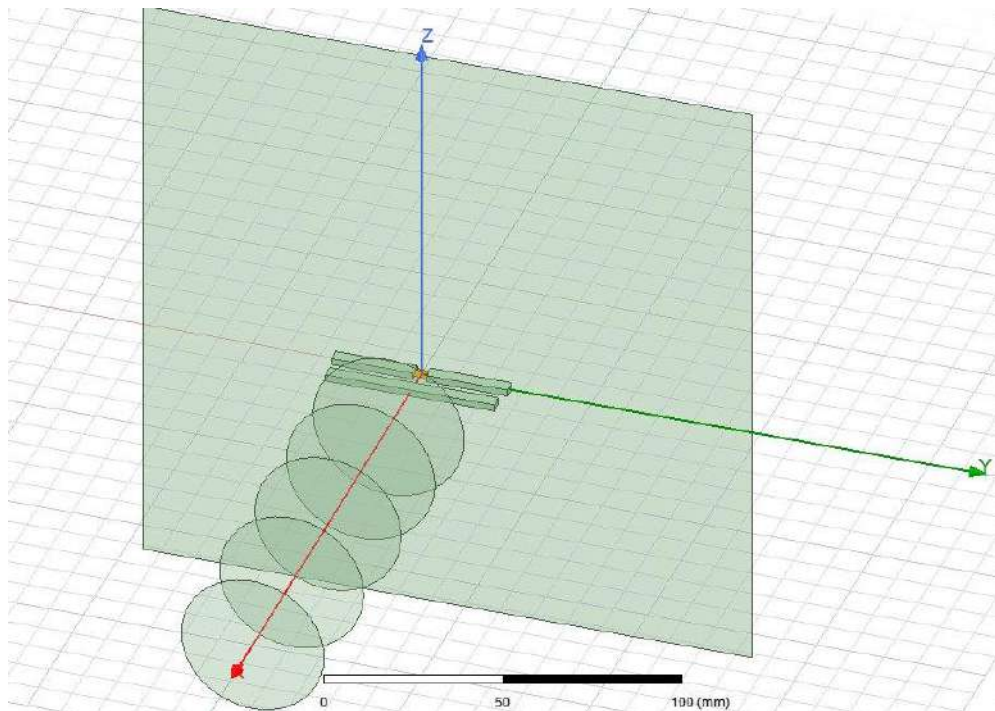


Рисунок 2.43 – Спрощена модель антени для перевірки працездатності

Отриманий графік коефіцієнту підсилення від частоти для тестової моделі можна побачити на рисунку 2.44.

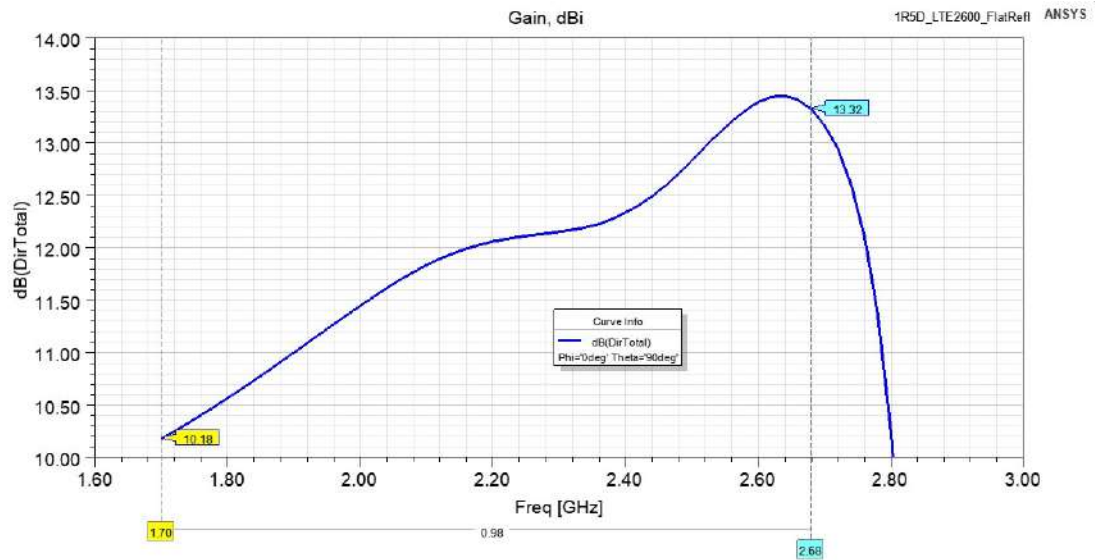


Рисунок 2.44 – Графік залежності коефіцієнту підсилення від частоти для тестової моделі

Як можна побачити тестова модель показала нормальний результат по підсиленню у потрібному нам діапазоні 1700-2700 МГц, тому далі можна додати по п'ять таких директорів до кожного вібратора нашої антени та подивитись на кінцевий результат (рис. 2.45).

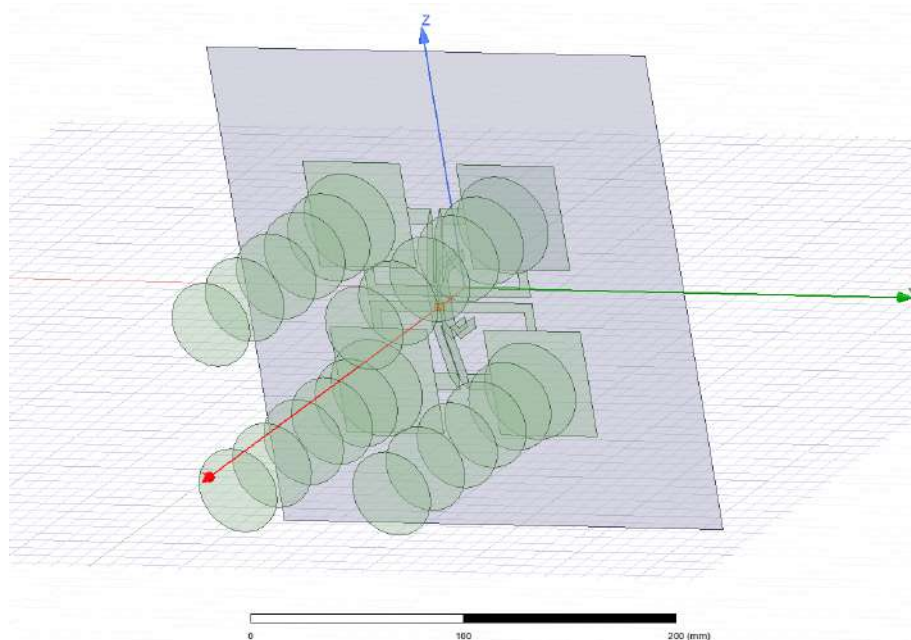


Рисунок 2.45 – Зовнішній вигляд антени з п'ятьма директорами

Отримані графіки можна побачити нижче на рисунках 2.46-2.48.

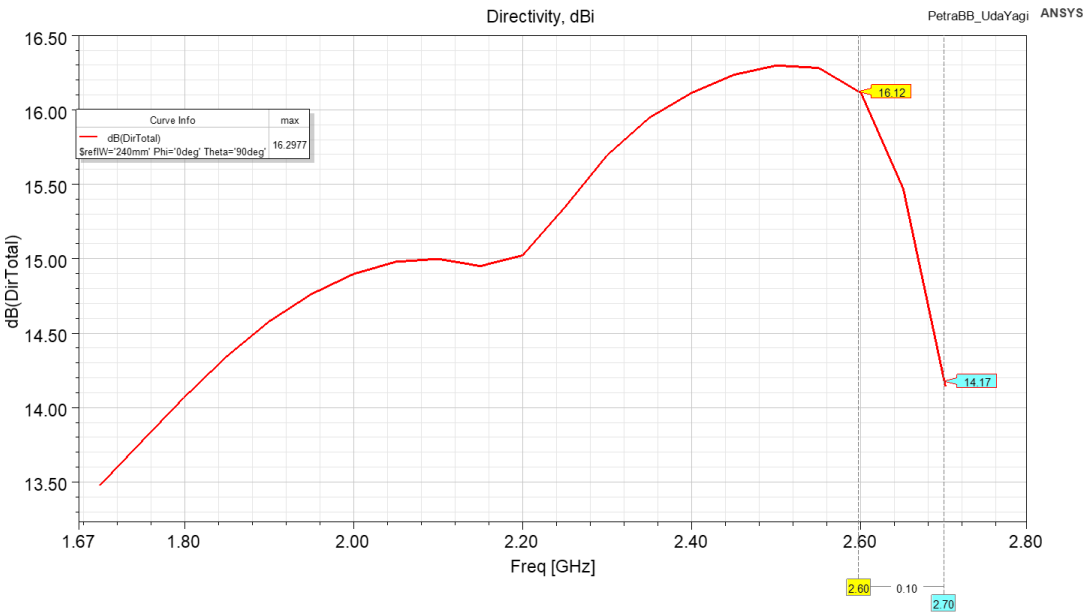


Рисунок 2.46 – Отриманий графік коефіцієнту підсилення після модифікації

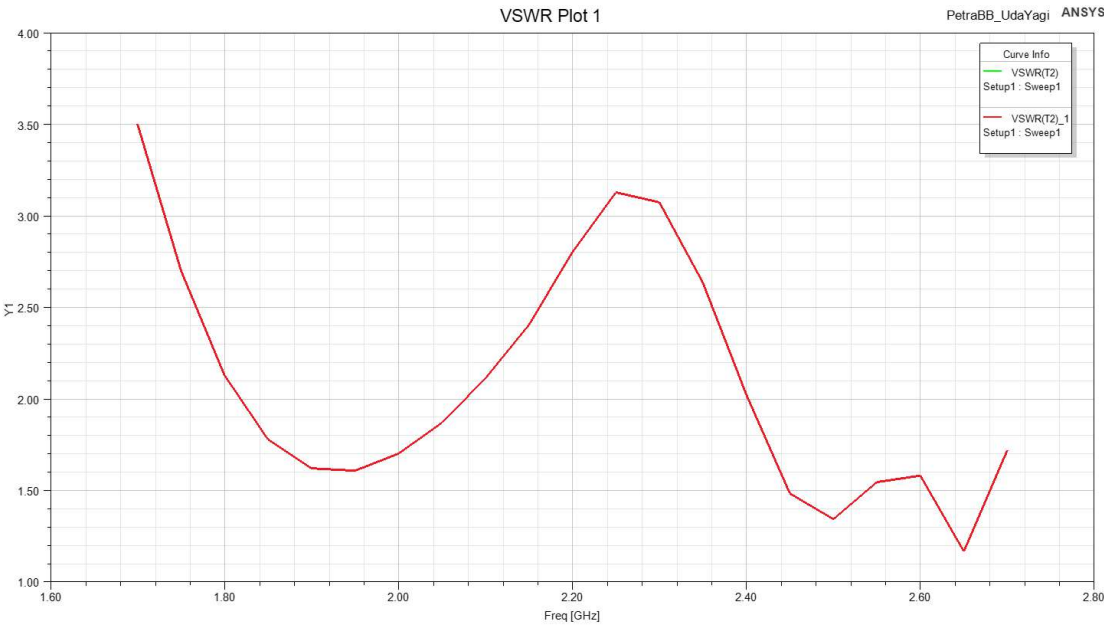


Рисунок 2.47 – Графік КСХ для модифікованого варіанту

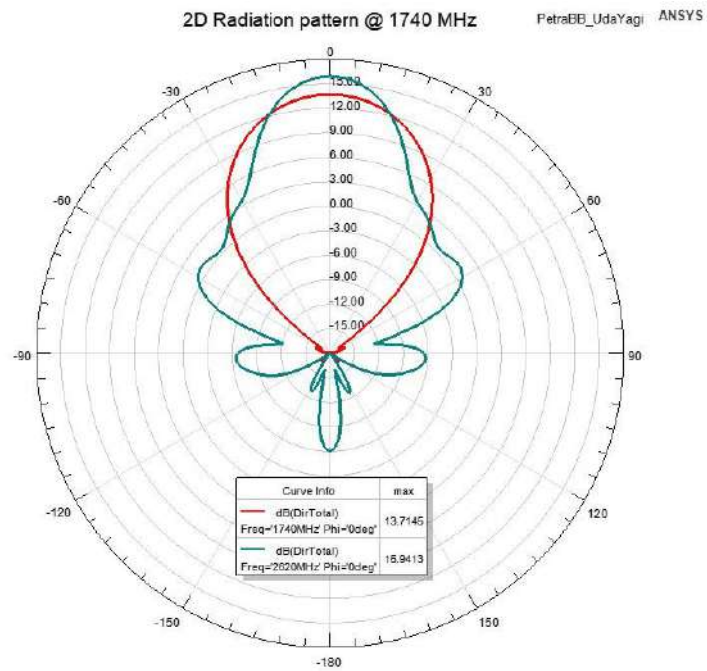


Рисунок 2.48 – ДН модифікованого варіанту для 1740 та 2620 МГц

Для того щоб явно побачити результат скористаємося можливістю додати на графіки вище данні які ми отримали до додавання директорів, в результат можна побачити нижче на рисунках 2.49-2.50.

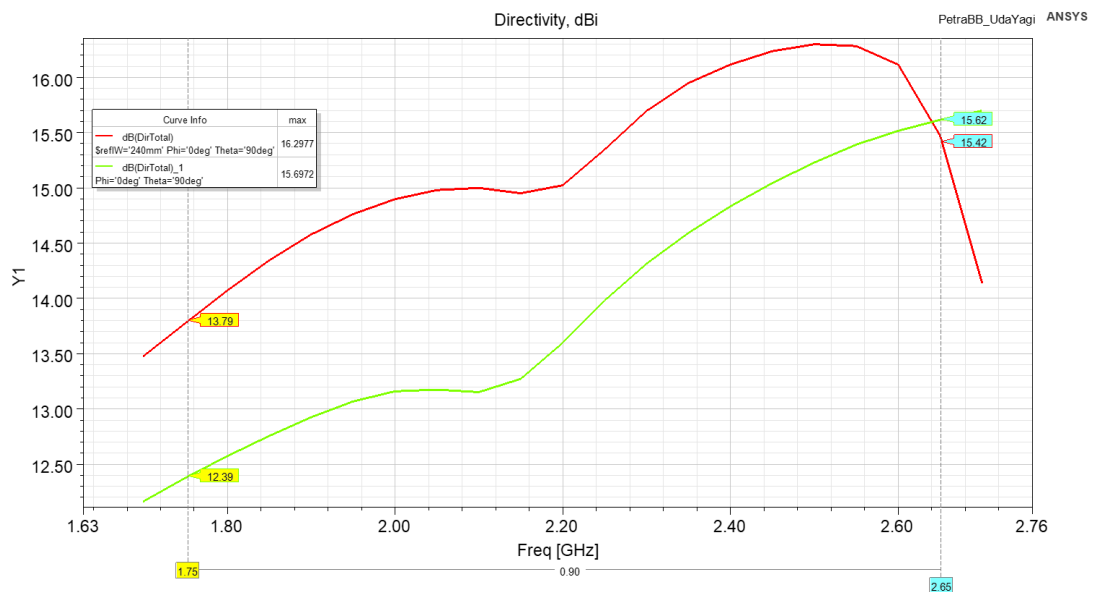


Рисунок 2.49 – Графік підсилення до додавання директорів (зелений графік) та після (червоний графік)

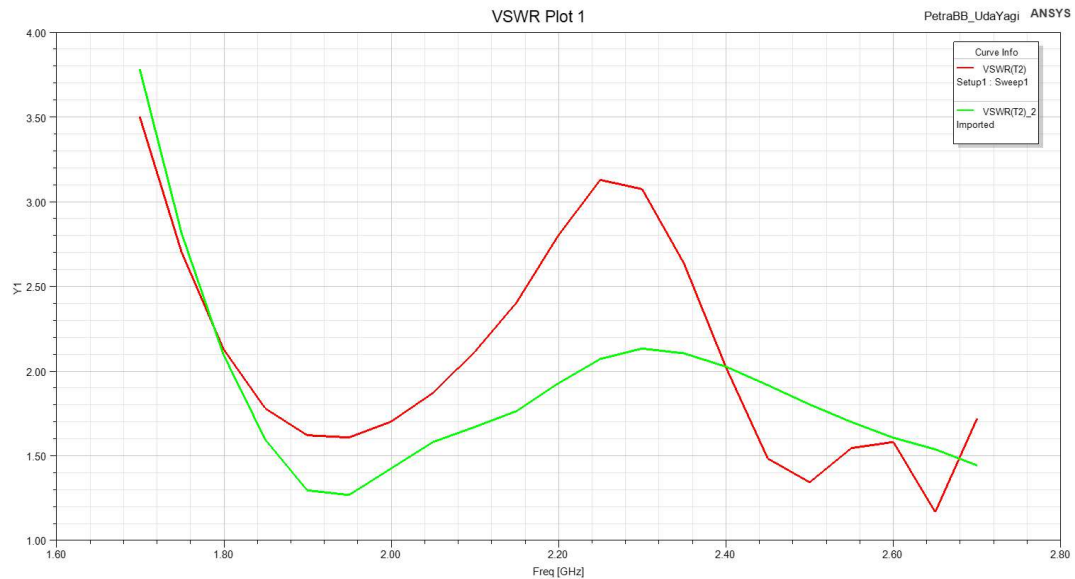


Рисунок 2.50 – Графік КСХ до додавання директорів (зелений графік)
та після (червоний графік)

На графіку коефіцієнту підсилення (рис. 2.49) можна побачити, що ми отримали покращення підсилення у діапазоні 1700-2600 МГц на більше ніж децибел майже на всьому діапазоні частот, що є дуже хорошим результатом.

Але на відрізку 2600-2700 МГц отримали різкий завал підсилення, можливо це сталося через взаємодію ліній живлення антени з директорами. Це можна перевірити видаливши лінії живлення для другого порту МІМО, таким чином зробивши антену з одним портом (SISO). Антену, що вийшла після видалення ліній живлення можна побачити на рисунку 2.51.

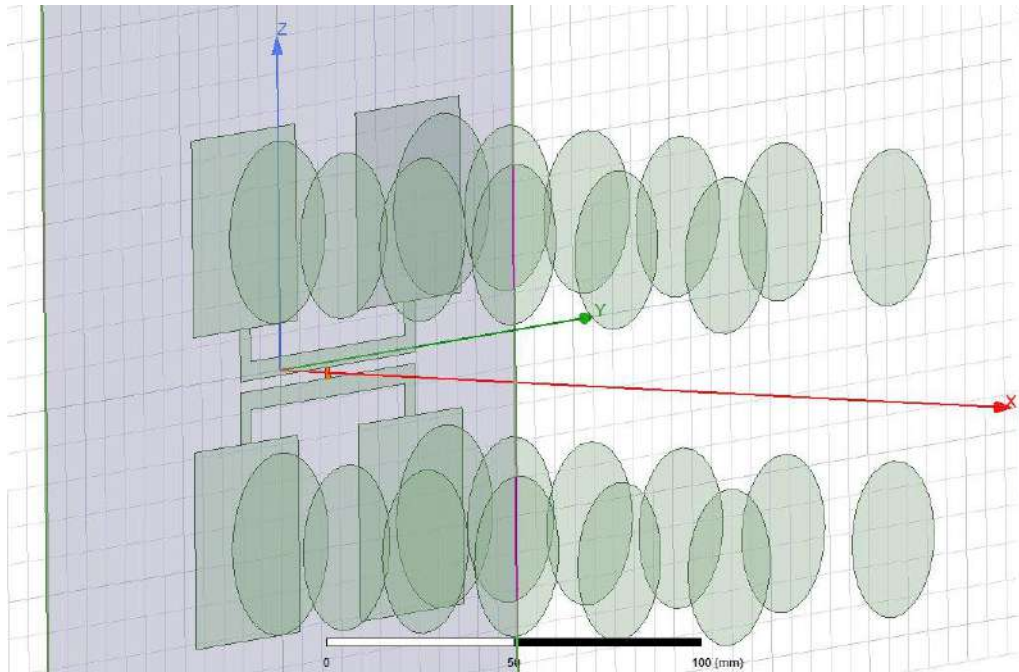


Рисунок 2.51 – Антена з видаленими стійками для другого МІМО порту

У результаті отримуємо зменшення провалу у 0.79дБм, отже гіпотеза була вірною.

На графіку КСХ (рис. 2.50) можна побачити що ми не отримали якоїсь значної зміни у сторону погіршення чи покращення, що також є гарним результатом. Діаграма направленості також не зазнала суттєвих змін.

2.6 Порівняння модифікованої та не модифікованої антени

На цьому можна закінчити з спробами оптимізації та перейти до порівняння характеристик антени яку ми взяли за основу, та варіант з усіма модифікаціями. Порівняння можна побачити нижче на рисунках 2.52-2.56.

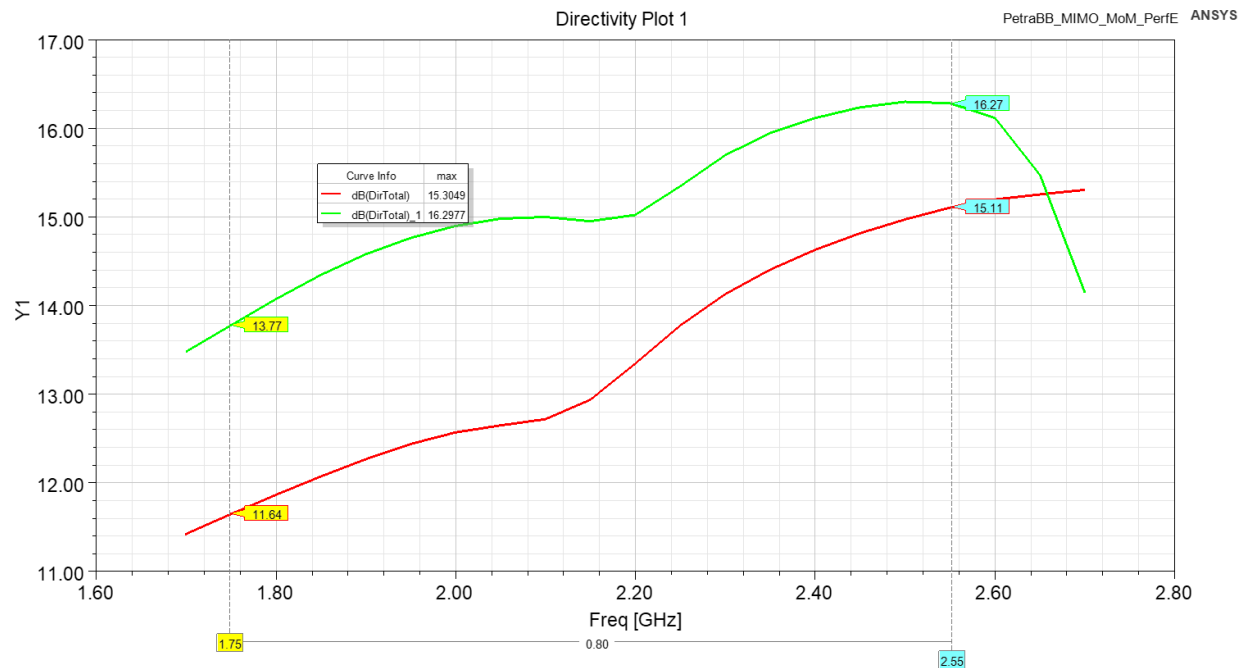


Рисунок 2.52 – Графік залежності коефіцієнту підсилення від частоти антени без модифікацій (червоний графік) та з модифікаціями (зелений графік)

Як видно на графіку коефіцієнту підсилення (рисунок 2.52) отримали значне покращення підсилення.

Коефіцієнти підсилення на частотах вивантаження (uplink) для відповідних діапазонів мають такі значення: 1750 МГц (1800) – 13.76 дБ (+2.13), 1950 МГц (2100) – 12.44дБ (+2.33) , 2530 МГц (2600) – 16.29дБ (+1.24).

Коефіцієнти підсилення на частотах завантаження (downlink) для відповідних діапазонів мають такі значення: 1840 МГц (1800) – 14.08 дБ (+2.06), 2140 МГц (2100) – 14.96дБ (+2.09) , 2655 МГц (2600) – 15.49дБ (+0.24).

На рисунку 2.53 можемо побачити, що після оптимізації отримали дещо кращий КСХ, який є дуже хорошим результатом для антени побутового призначення.

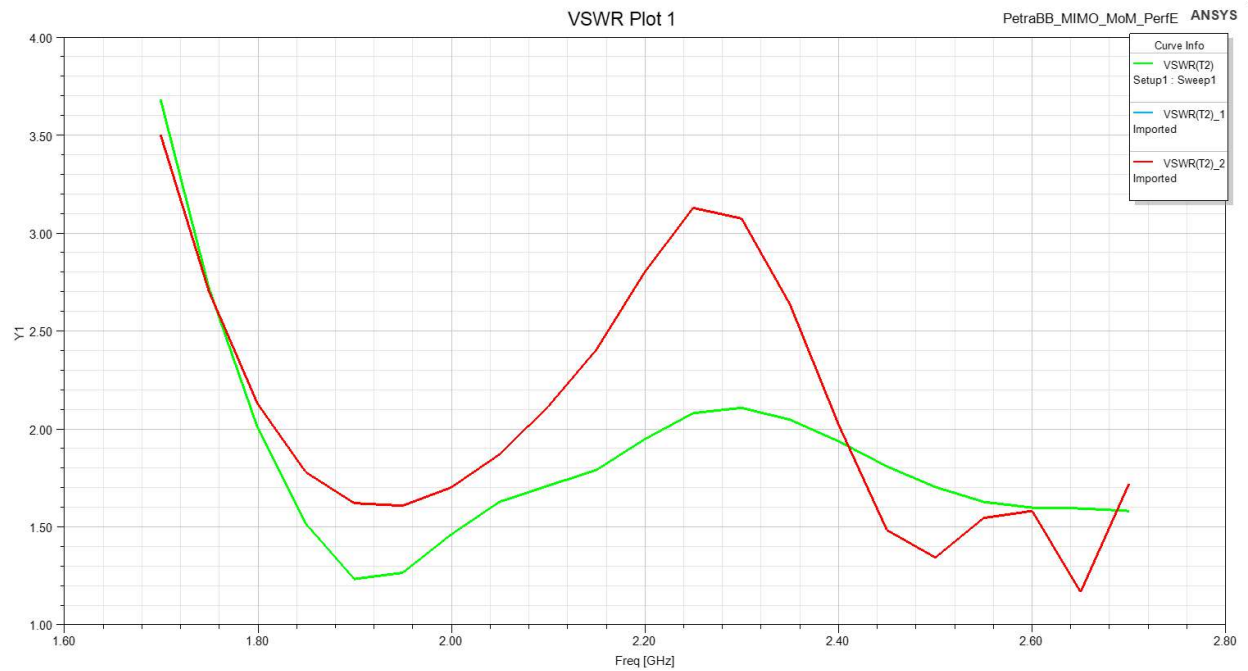


Рисунок 2.53 – Графік КСХ для антени без модифікацій (червоний графік) та з модифікаціями (зелений графік)

Отримані значення КСХ після модифікацій порівняно з антеною без модифікацій на відповідних частотах вивантаження (uplink): 1750 МГц (1800) – 2.74 дБ (-0.02), 1950 МГц (2100) – 1.61дБ (+0.34) , 2530 МГц (2600) – 1.45дБ (-0.21).

Отримані значення КСХ після модифікацій порівняно з антеною без модифікацій на відповідних частотах завантаження (downlink): 1840 МГц (1800) – 1.83дБ (+0.24), 2140 МГц (2100) – 2.37дБ (+0.59) , 2655 МГц (2600) – 1.21дБ (-0.38).

На графіку (рис. 2.54) можна побачити, що отримали дещо гіршу ізоляцію портів МІМО, але вона знаходиться на прийнятному рівні для антен.

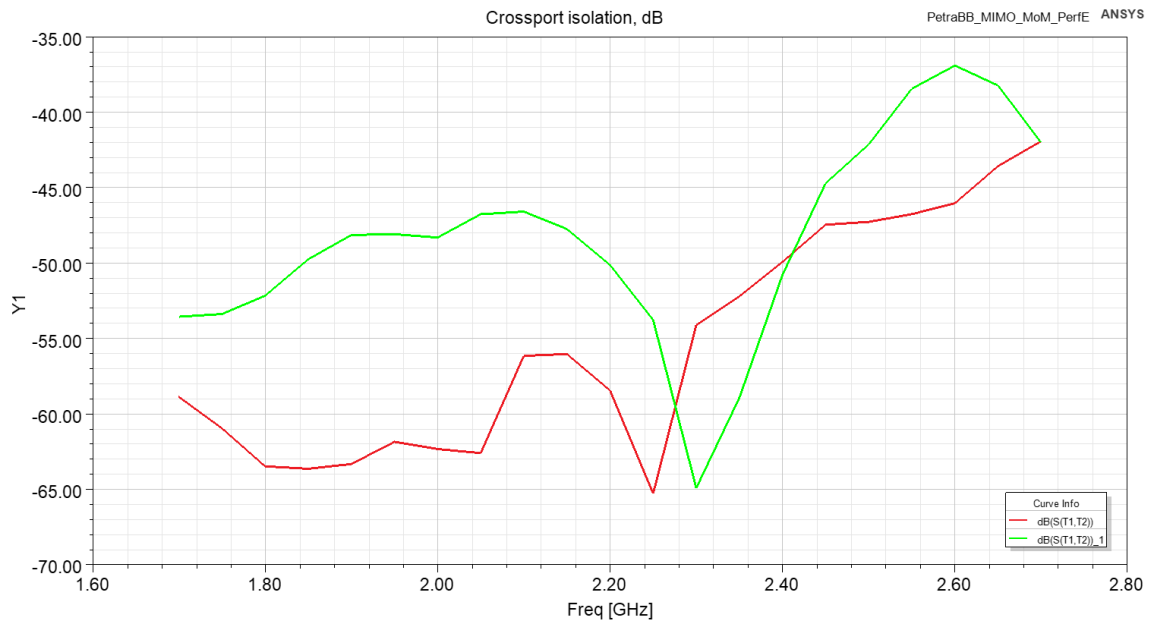


Рисунок 2.54 – Графік ізоляції портів МІМО для антени до оптимізації (червоний графік) та після (зелений графік)

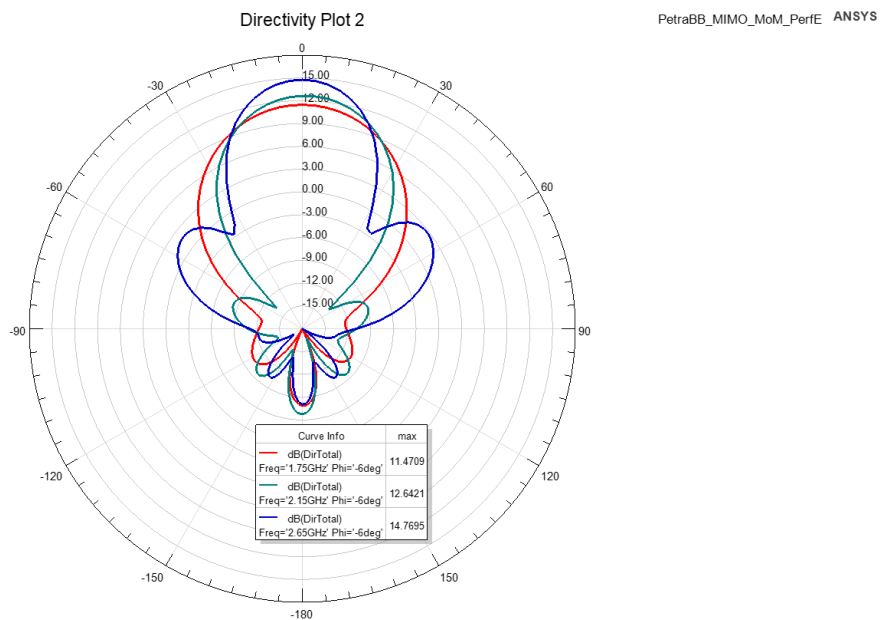


Рисунок 2.55 – ДН антени до оптимізації для частот 1750, 2150 та 2650 МГц

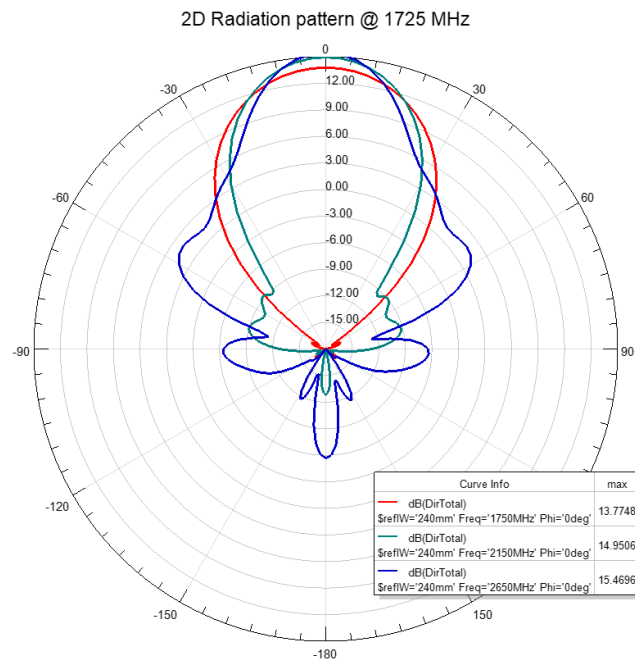


Рисунок 2.56 – ДН антени після оптимізації для частот 1750, 2150 та 2650 МГц

Як можна побачити з порівняння отримали дещо кращу діаграмі спрямованості для частот 1750 та 2150 МГц, а для 2650 МГц вона майже не змінилася. Для всіх частот діаграма спрямованості відповідає вимогам для якісно виконаних та узгоджених антен.

3 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК

3.1 Опис ідеї та аналіз потенційних покупців

Ідея дипломного проекту полягає у тому, щоб взяти антену яка вже продається на ринку та різноманітними оптимізаціями покращити її характеристики. Опис ідеї можна побачити нижче в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для споживачів
Покращення характеристик антени	1. Використання антени для 3G/4G модемів.	Покращення характеристик антени, що вплине на якість та стабільність роботи.
	2. Використання антени для 3G/4G «репітерів»	Покращення характеристик антени, що вплине на якість та стабільність роботи.

Після опису ідеї треба визначити потреби, що потребує ринок, та потенційні групи клієнтів, охарактеризувати їх, сформувати орієнтовний перелік вимог до товару (робіт чи послуг) для кожної групи, що відображено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці клієнтів	Вимоги споживачів
1	Якісний інтернет у віддалених куточках країни	Домогосподарства без доступу до проводового інтернету	Різні фінансові можливості клієнтів	Не дорога та якісна антена з високим коефіцієнтом підсилення

Продовження таблиці 3.2

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці потенційних груп клієнтів	Вимоги споживачів
2	Якісний зв'язок у віддалених куточках країни	Домогосподарства без доступу до нормального стільникового зв'язку	Різні фінансові можливості клієнтів	Не дорога та якісна антена з високим коефіцієнтом підсилення

Далі проведемо SWOT-аналіз – це підхід до планування, заснований на виявленні внутрішніх і зовнішніх факторів об'єкта. За допомогою такого аналізу можна визначити: Сильні сторони, слабкі сторони, зовнішні обставини та загрози. SWOT-аналіз можна побачити у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – SWOT-аналіз

Сильні сторони	Слабкі сторони
– співвідношення якості/ціна якої нема на ринку; – відсутність подальшої стратегії	– ціна порівняно з неякісними конкурентами; – відсутність бюджету на подальші дослідження
Можливості	Загрози
– розширення території продажу; – вихід у сегмент де мала конкуренція; – використання реклами	– поява сильних конкурентів; – ріст витрат

Наступним етапом розробляється ринкова стратегія. Першим етапом розробки ринкової стратегії є визначення стратегії охоплення ринку – опис цільових груп споживачів, що відображено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмента
1	Клієнти у містах	Відсутня через наявність проводового інтернету та стільникового зв'язку	Відсутній	Дуже висока	Дуже висока
2	Клієнти у віддалених селах	Високий попит на розробку через відсутність проводового інтернету та стільникового зв'язку	Високий	Висока	Низька
3	Клієнти у населених пунктах біля автодоріг	Дуже низький через майже повну наявність проводового інтернету та стільникового зв'язку	Дуже малий	Висока	Висока
Обрана цільова група: Клієнти у віддалених селах					

Цільову групу «Клієнти у віддалених селах» було вибрано як саму оптимальну через те, що група «Клієнти у містах» має дуже малий попит через велику проникність провідного інтернету, та хорошого покриття стільниковими мережами, група «Клієнти у населених пунктах біля автодоріг» теж має невеликий ринок збуту (більший ніж у містах, але менший ніж у віддалених селах) також через значну проникність проводового інтернету та нормального покриття стільниковими мережами.

Далі треба провести аналіз стейкхолдерів підприємства – ринкових суб'єктів, які мають інтерес до діяльності підприємства або до деяких напрямів його діяльності, але цей інтерес не оснований на одному на бажанні

отримати чистий дохід, та коротко описати роль кожного. Стейкхолдери поділяються на такі типи як:

а) внутрішні:

- менеджери, які зацікавлені в отриманні фінансової інформації, що дозволяє зробити найбільш достовірну оцінку ефективності управління підприємством;

- власники, які зацікавлені у розвитку та нормальній роботі підприємства;

- рада директорів, які зацікавлені в отриманні інформації для побудови стратегічних напрямків діяльності підприємства;

- працівники, які зацікавлені в отриманні інформації про здатність підприємства своєчасно виплачувати зарплату, проводити пенсійні та інші виплати;

- профспілка, яка представляє інтереси робітників, захищає їх права інтереси;

б) зовнішні:

- інвестори, які вкладають у компанію свій капітал з певною часткою ризику з метою отримання доходу у майбутньому;

- кредитори, які тимчасово надають підприємству позику в обмін на деякий наперед встановлений дохід і зацікавлені в інформації, що дозволяє їм визначити, чи будуть своєчасно здійснені виплати по кредиту;

- постачальники, зацікавлені в інформації, що дозволяє їм визначити, чи своєчасно виплатять належні їм суми;

- суспільні і державні організації, так як від успішного функціонування підприємства залежить стан економічної інфраструктури регіону;

- споживачі, що зацікавлені в отриманні якісного продукту за ринковими цінами, чи навіть нижче, та подальшою підтримкою купленого продукту з боку виробника;

– конкуренти, що зацікавлені у тому щоб заволодіти внутрішньою інформацією підприємства, для впровадження нових розробок разом з конкурентом.

Інвесторами для даного проекту може бути:

а) держава – через зацікавленість в інтернетизації шкіл, дитячих садків, органів місцевого самоврядування. Хоча основним завданням зараз є проведення оптичного інтернету, але є багато місць куди провести інтернет таким способом дуже затратно;

б) інтернет магазини обладнання – зможуть продавати не тільки модеми та роутери, а й набори з антеною, що збільшить коло потенційних покупців;

в) фірми що вже виробляють антени – зацікавлені в можливості продажу даної розробки під своїм брендом, не витрачаючи час на розробку та виробництво, лише інвестуючи у розробку та купуючи за оптовими цінами. Така практика давно розповсюджена у світі, багато товарів окремого виробника часто виробляють інші фірми.

Основними потенційними покупцями, як було з'ясовано при виборі цільових груп, будуть клієнти у віддалених селах через малу проникність оптичного інтернету, або високої дороговизни його проведення. У меншій мірі покупцями будуть клієнти у населених пунктах вздовж автодоріг де інтернет провайдери через малу конкуренцію можуть виставляти надвисокі ціни на підключення та абонплату. Також невелика кількість клієнтів буде у містах, де є території (наприклад колишні виробничі цехи, чи склади, де зараз розміщуються різноманітні невеликі підприємства, які беруть частини приміщень у оренду) куди власник приміщень може не пускати інших провайдерів окрім обраних, у яких ціни будуть значно вище ринкових, тому вигідніше буде організувати безпроводний інтернет.

3.2 Планування робіт

З метою оцінки ефективності роботи над проектом потрібно провести аналіз економічної ефективності. Для цього треба оцінити всі можливі затрати на проектування та виробництво, знайти можливі шляхи зменшення затрат провівши ретельний аналіз проблеми, ситуації на ринку, спланувати подальший план дій та реалізувати його.

У даній економічній частині буде проведено розрахунок економічного ефекту дипломної роботи на тему «Оптимізація МІМО-антени для діапазону 1800..2600 МГц», а саме буде оцінено доцільність проведених змін в антені з огляду на їх ефективність та ситуацію на ринку антен. Данну роботу буде розбито на етапи описано в табл. 3.5

Проектування є важливим етапом, що займає значну частину загального часу розробки та є дуже важливим, адже треба проаналізувати проблему, знайти варіанти їх вирішення, визначити оптимальні шляхи, підготуватися до реалізації проекту.

Перевірка роботи пристрою також є важливим етапом, дозволяє виявити можливі помилки які були допущені на попередньому етапі.

Наступний етап – доробка та усунення недоліків дозволяє усунути можливі помили та додати деякі можливі покращення чи оптимізації перед тим як запускати серійне виробництво. У процесі перевірки могли виникнути деякі непередбачені нюанси пов'язані, безпосередньо, з виробництвом, тому перед запуском у серійне виробництво треба всі можливі проблеми вирішити.

Останнім етапом є оформлення документації, наприклад такої як складальне креслення, документація на вибір та ін. Після чого можна безпосередньо починати вироблення виробу та його реалізацію.

Тривалість НДР залежить від безлічі факторів, передбачити які неможливо. Тому, у зв'язку з новизною технічної проблеми, використовуємо вірогідну оцінку часу, яка визначається по кожному етапу робіт:

$$t_{оч} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5} , \quad (3.1)$$

де $t_{оч}$ – очікувана оптимальна оцінка часу виконання НДР, днів;

t_{min} – Мінімально необхідний час виконання роботи при найбільш сприятливих умовах, днів;

t_{max} – Максимальні витрати часу на виконання роботи по даному етапу при несприятливих умовах, днів.

$$t_{оч1} = (3*15 + 2*19) / 5 = 16.6.$$

Правильність визначення $t_{оч}$ перевіряється розрахунком дисперсії - розкиду між мінімальною і максимальною оцінкою часу. Дисперсія являє собою середнє значення квадрата відхилення тривалості роботи від її очікуваного значення і визначається за формулою:

$$\sigma^2(t) = \left(\frac{t_{max} - t_{min}}{5} \right)^2. \quad (3.2)$$

Якщо $\sigma^2(t) \leq 1$, то ступінь невизначеності оцінки часу робіт по даному етапу мала.

$$\sigma^2_1 = [(20 - 15) / 5]^2 = 1.$$

Проведемо аналогічні розрахунки для інших етапів, отримані результати занесемо у табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Тривалість виконання етапів НДР

Етапи НДР	Тимчасові оцінки			Дисперсія	Виконавці	
	t_{min} днів	t_{max} днів	$t_{оч}$ днів		Спеціальність	Кількість , чол
Проектування	15	20	16.6	1	Інженер – конструктор, інженер- програміст	2
Перевірка роботи пристрою	2	4	2.8	0.16	Інженер - конструктор	1
Доробка та усунення недоліків	4	6	4.8	0.08	Інженер – конструктор, інженер- програміст	1
Оформлення документації на виріб	4	7	5.2	0.36	Інженер - конструктор	1
Разом	25	37	29,4	1,6	-	2

3.3 Побудова мережевого графіку

Мережевий графік являє собою інформаційно-динамічну модель, в якій відображено взаємозв'язки і результати всіх робіт, необхідних для досягнення кінцевої мети проектування. При побудові мережного графіка використовуються два графічних елемента: роботи і події.

Мережевий графік дозволяє отримати модель процесу, необхідний для керівників підприємства, який дозволяє ефективно корегувати на вносити зміни до виконуваних робіт та стежити за ходом виконання, що в свою чергу дозволяє швидко адаптуватися до нових обставин у виробництві.

Мережевий графік для даної магістерської роботи наведено у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Перелік робіт мережевого графіка

№	Код робіт	Найменування роботи	Тривалість, днів
1	0–1	Аналіз технічного завдання	2
2	1–2	Узгодження проекту	1
3	2–3	Вирішення оптимального напрямку рішення завдання	1
4	3–4	Розробка виробу у ПЗ	7
5	4–5	Аналіз оригінального виробу	1
6	5–6	Зміна параметрів на оптимальні	4
7	6–7	Аналіз з оптимальними параметрами	2
8	7–8	Доопрацьовування схеми, додаткове поліпшення параметрів	4
9	8–9	Повторний аналіз з доопрацьованими параметрами	1
10	9–10	Оформлення документації	1
11	10–11	Здача в експлуатацію	1
	Всього		25

На рисунку 3.1 зображено мережевий графік.

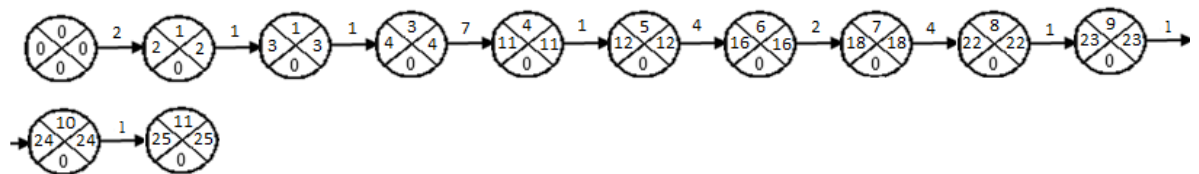


Рисунок 3.1 – Мережевий графік проекту

3.4 Розрахунок витрат

Розрахунок загальних витрат на виготовлення виробу включає в себе: витрати на електроенергію, витрати на матеріали та на людський час. Кількість витрат визначається з огляду на норми витрати матеріалу на ін.

Ціни на матеріали та електроенергію беруться за цінами станом на 01.09.2021.

Загальну калькуляцію усіх витрат буде подано після обрахунку витрат по усім категоріям.

Визначення витрат на матеріали.

У вартість матеріалів включаються витрати на матеріали для проведення дослідження. Їх кількість визначається на підставі програми дослідження, норм витрати, кількості годин випробувань та інших даних. Ціна матеріалу визначається за цінами станом на 01.09.2021 р.

Витрати на основні матеріали знаходяться з розрахунку їх вартості та кількості. Транспортно-заготівельні витрати складають 5% від вартості матеріалів. Вихідні дані й розрахунки вартості матеріалів заносяться в таблицю 3.7.

Таблиця 3.7 – Розрахунок витрат на матеріали

Матеріал	Витрата матеріалу на тему, шт.	Ціна за одиницю, грн.	Сума витрат, грн.
Папір А4	500	0.27	135
Картридж для принтера	1	590	590
Разом:	—	—	725
Транспортно-заготівельні витрати	—	—	36.25
Всього з урахуванням транспортно-заготівельних витрат:	—	—	761.25

Витрати на електричну енергію.

Витрати на електричну енергію E_c визначаються за формулою:

$$E_c = \frac{M_y \Phi_{ef} K_n C_e}{\text{КПД}}, \quad (3.3)$$

де M_y – потужність, споживана електроприладом, кВт;

$\Phi_{\text{эф}}$ – ефективний фонд часу роботи даного виду обладнання г.;

K_n – коефіцієнт використання енергетичних установок по потужності і часу, що дорівнює 0.8;

C_e – ціна 1 кВт*год електроенергії, ККД-коефіцієнт корисної дії, приймається рівним 0.9.

Калькуляцію витрат на електроенергію обладнання заносимо до таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Розрахунок вартості енергоресурсів

Обладнання	Вид енергоресурсів	Потужність обладнання, кВт	$\Phi_{\text{эф}}$, год.	Тариф, грн.	Вартість, грн.
Принтер HP DeskJet 2720	Електроенергія	0.15	10	3.2	4.8
ПК Lenovo ThinkCentre M70s	Електроенергія	0.18	160	3.2	92.16
Освітлення	Електроенергія	0.10	200	3.2	64
Всього	-	-	-	-	160.96

Розрахунок амортизації універсального обладнання.

Сума амортизаційних відрахувань від балансової вартості універсального устаткування, апаратів і приладів, які відносяться до основних фондів, розраховуються з урахуванням використання їх для даної НДР. Результати розрахунку зведені в таблицю 3.9.

Сума амортизації обраховується шляхом ділення річної суми амортизації (вартість обладнання помножено на норму амортизації) розділеної на час роботи обладнання.

Таблиця 3.9 – Розрахунок суми амортизаційних відрахувань

Обладнання	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %	$\Phi_{эф}$, год.	Сума амортизації, грн.
ПК Lenovo ThinkCentre M70s	14500	50	160	397.2
Принтер HP DeskJet 2720	1600	50	10	2.73
Освітлення	750	50	200	25.68
Всього	16100		170	425.61

Розрахунок заробітної плати робітників та супутні витрати.

Далі треба порахувати витрати на заробітну плату робітників. В дану статтю включається заробітна плата всіх категорій працівників, які безпосередньо зайняті у процесі проведення розробки. Сума заробітної плати розраховується на основі зайнятості виконавців по окремих етапах робіт. Розрахунок основної заробітної плати зведений в табл. 3.10

Таблиця 3.10 – Розрахунок основної заробітної плати

Посада	Кіл-ть, чол.	Оклад, грн.	Середньо-денна зарплата, грн.	Зайнятість НДР, днів	Підсумкова сума зарплати, грн.
Інженер – конструктор	1	12500	595	25	14875
Інженер-програміст	1	14500	690	19	13110
Разом	2	–	–	–	27985

Додаткова заробітна плата дорівнює 12% від основної заробітної плати, що становить :

$$C_{\text{дод}} = 0.12 * C_{\text{осн}}, \quad (3.4)$$

$$C_{\text{дод}} = 0.12 * 27985 = 3358,2 \text{ грн.}$$

Сумарна заробітна плата, таким чином, складе :

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{дод}} + C_{\text{осн}}, \quad (3.5)$$

$$C_{\text{заг}} = 27985 + 3358.2 = 31343,2 \text{ грн.}$$

До підсумковій суми основної зарплати робітників треба додати премію та всі доплати до річного фонду в розмірах, що встановлені у лабораторії де проводиться розробка.

Відрахування до Фонду соціального страхування визначаються у відсотковому співвідношенні від повної суми виплат працівникам (з урахуванням додаткової заробітної плати, усіх премій та надбавок).

Відрахування дорівнюють 22%, що при 50%-премії складатиме :

$$C_{\text{пр}} = 0.5 * C_{\text{осн}}, \quad (3.6)$$

$$C_{\text{пр}} = 0.5 * 27985 = 13992.5 \text{ грн.}$$

$$C_{\text{фсс}} = (C_{\text{заг}} + C_{\text{пр}}) * 0.22, \quad (3.7)$$

$$C_{\text{фсс}} = (31343.2 + 13992.5) * 0.22 = 9973.8 \text{ грн.}$$

Також до списку витрат додаються накладні витрати, що пов'язані з організацією, керуванням та обслуговуванням підприємства. Зазвичай накладні витрати приймають у діапазоні від 60 до 100 % основної заробітної плати виконавців.

$$C_{\text{накл}} = 0.7 * C_{\text{осн}}, \quad (3.8)$$

$$C_{\text{накл}} = 0.7 * 27985 = 19589,5 \text{ грн.}$$

Загальні фінансові витрати.

Загальні фінансові витрати на реалізацію пристрою становитимуть суму усіх порохованих вище витрат :

$$V_{\text{заг}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{аморт}} + C_{\text{ел.ен}} + C_{\text{осн}} + C_{\text{дод}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{фсс}} + C_{\text{накл}}, \quad (3.9)$$

$$V_{\text{заг}} = + + 160.96 + 27985 + 3358.2 + 13992.5 + 9973.8 + 19589.5 = 76246.82 \text{ грн.}$$

Кошторис витрат на вивчення і аналіз завдання, а також на проектування та виготовлення спеціалізованого технологічного обладнання наведена в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Кошторис витрат на реалізацію поставленої задачі

Статті витрат	Сума, грн.	Питома вага до підсумку, %
Заробітна плата основна	27985	36.7
Амортизаційні витрати	425.61	0.56
Витрати на матеріали	761.25	1
Заробітна плата додаткова	3358.2	4.4
Нараховані премії	13992.5	18.35
Відрахування на соц. страхування	9973.8	13.09
Витрати на електроенергію	160.96	0.21
Накладні витрати	19589.5	25.69
Разом	76246.82	100

3.5 Розрахунок економічної ефективності НДР

Для теоретичних досліджень в більшості випадків важко або навіть неможливо розрахувати економічний ефект, тому доцільно визначити їх

техніко-економічну ефективність з урахуванням наступних показників: важливості дослідження для народного господарства; складності розробки; результативності та важливості використання. Важливість теоретичного дослідження оцінюють за його призначенням: вирішення проблемних питань; задоволення вимог спеціальної техніки; пошук принципово нових конструктивних і технологічних рішень.

Результативність НДР визначається по повноті рішень поставленої задачі: отриманий результат відповідає планованому; задовільний (часткове рішення); негативний. Аналіз залежності між цими показниками і витратами на їх досягнення дає можливість кількісної оцінки техніко-економічних показників теоретичних НДР по формулі:

$$K_{\text{НДР}} = \frac{J^n \cdot R \cdot T}{Z_{\text{НДР}} \cdot t_{\text{НДР}}}, \quad (3.9)$$

де $K_{\text{НДР}}$ – рівень ефективності дослідження;

J^n – важливість роботи;

R – результативність роботи;

T – технічна складність;

$Z_{\text{НДР}}$ – витрати на проведення НДР.

Для НДР час яких виконання не більше 2 років, допустимі значення коефіцієнтів наведені в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Значення оціночних факторів

Оціночні фактори	J	R	T	$Z_{\text{НДР}}$	$T_{\text{НДР}}$	N
Допустимі значення	2..5	1..4	1..3	-	-	1..8
Прийняті значення	4	3	2	76246.82	0.1	7

$$K_{\text{НДР}} = \frac{4^6 \cdot 3 \cdot 2}{76246.82 \cdot 0.1} = 3.22.$$

Так як коефіцієнт вийшов рівним 3.22, що відповідає нерівності $K_{\text{НДР}} > 1$, то це значить, що проведена робота має економічний сенс.

3.6 Розрахунок фінансового результату

Цей етап дозволяє визначити очікуваний дохід, фінансовий результат та фінансовий результат за інноваційним проектом.

Витрати на виробництво становлять 76246.82, відповідно собівартість одного виробу при виробництві 300 штук буде:

$$Ц_{\text{п}} = 76246.82/300 = 254.15 \text{ грн.} \quad (3.10)$$

Ціна одного виробу буде дорівнювати витратам на виробництво одного виробу плюс планований прибуток:

$$Ц_{\text{п2}} = 254.15 + 150 = 404.15 \text{ грн.} \quad (3.11)$$

Тоді дохід за всю партію буде рівним:

$$Д_{\text{пар}} = 404.15 * 300 = 121245 \text{ грн.} \quad (3.12)$$

Фінансовий результат розраховується шляхом помноженням прибутку на кількість продукції та буде дорівнювати:

$$\Phi_{\text{р}} = 150 * 300 = 45000 \text{ грн.} \quad (3.13)$$

Цифри для наступного року розраховуємо аналогічно та заносимо у табл.3.13.

Таблиця 3.13 – Розрахунок фінансового результату

№ періоду	Обсяги виробництва (послуг)	Обсяги реалізації	Залишок нереалізованої продукції	Ціна 1 од., грн.	Витрати на 1 од., грн.	Прибуток з 1 од., грн	Дохід з партії, грн	Фінансовий результат, грн
1 рік	300 шт	300 шт	0	404.15	254.15	150	121245	45000
2 рік	680 шт	680 шт	0	404.15	254.15	150	274822	102000
Разом	-	-	-	-	-		396067	147000

Після розрахунку фінансового результату стали відомі такі показники: дохід, витрати та фінансовий результат, який за 2 роки становить 147000 грн.

Серед можливих ризиків можна виділити появу конкурентів з цінами нижчими ніж розраховані у дипломному проекті, але шанс дуже малий через те, що розроблена антена має унікальний дизайн та важка у виробництві, але натомість має гарні характеристики. Інноваційність розробки дозволяє робити націнку майже у 40%, і навіть у такому випадку кінцева ціна на виріб буде нижче ніж у антен конкурентів з такими ж характеристиками.

3.7 Висновки економічного розділу

В даній дипломній роботі, яка присвячена «Оптимізації МІМО-антени для діапазону 1800..2600 МГц», був представлений розрахунок та планування НДР. Основною умовою раціонального планування розробки є скорочення матеріальних витрат та терміну виконання роботи. Перед виконанням розрахунків було проведено SWOT-аналіз та визначені стейкхолдери. В результаті розрахунків було встановлено: тривалість розробки – 25 днів, витрачена сума на НДР дорівнює 76246.82 грн. Розрахований коефіцієнт НДР дорівнює 3.22, який означає те що дана розробка має економічний сенс. Було розраховано фінансовий результат

який за 2 роки дорівнює 147000 грн., який перекриває ціну НДР та дозволяє отримати прибуток.

Тому можна зробити висновок про економічну доцільність та ефективність проведеної науково дослідницької роботи, що була присвячена «Оптимізації МІМО-антени для діапазону 1800..2600МГц». Також після оцінки фінансового результату можна зробити висновок про наявність економічної доцільності проекту.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Так як темою дипломного проекту є «Оптимізація МІМО-антени для діапазону 1800..2600 МГц», що передбачає роботи в приміщенні яке обладнане комп'ютерами та допоміжним обладнанням, треба розглянути низку питань з приводу забезпечення безпеки, гігієни праці, виробничої санітарії та пожежної безпеки для приміщень(або лабораторій) обладнаних комп'ютерами.

Виконуючи аналіз робіт, що будуть проводитися для виконання дипломного проекту у приміщенні яке обладнано комп'ютерами згідно ГОСТ 12.0.003-76 "Небезпечні і шкідливі виробничі чинники" всі чинники що виникають у процесі виробничих умов є небезпечними та шкідливими.

Небезпечні та шкідливі чинники можна розділити на групи такі групи:

- можливість короткого замикання та наступного за ним загоряння. Виникає через порушення техніки безпеки, роботі обладнання у не оптимальних умовах, наявності обладнання що працює при високих температурах. Це може привести до виникнення опіків кінцівок чи всього тіла, різного ступеня тяжкості, чи отруєнню чадним газом внаслідок пожежі;
- неправильні дії персоналу в умовах загоряння. Виникають через недотримання правил евакуації при пожежі з приміщення. Призводить до паніки, давки та небажаним наслідкам;
- недостатня освітленість робочого місця. Зумовлюється можливим виходом з ладу освітлювальних приладів робочого місця, недостатнім освітленням взимку або недотриманням норм праці. Може призводити до погіршення зору та поганого самопочуття через напруженість очей тривалий час;

- погані кліматичні умови. Викликаються поганим опаленням приміщення взимку та недостатнім охолодженням влітку. Також викликаються поганою вентиляцією. Призводять до захворювань пов'язаних з органами дихання, зниження загального імунітету;
- незадовільна ергономіка. Через неправильну організацію робочого місця та порядку проведення робіт може призводити до захворювань пов'язаних з центральною нервовою системою та захворювань кістково-м'язової системи;
- фізичні навантаження. Можуть виникати через порушення у організації робочого процесу, або через монотонність роботи у робітника, що призводить до статичного напруження м'язів рук, ший, спини. Призводять до перевтоми, захворювань пов'язаних з кістково-м'язовою системою;
- ураження електричним струмом. Виникають через несправність обладнання, відсутності або неправильного виконання заземлення, порушення ізоляції дротів чи порушення правил користування обладнанням;
- психологічні перевантаження. Викликаються стресовими ситуаціями через можливі складні відносини у колективі, нервові перевантаження або складністю робочого процесу. Можуть призводити до захворювань пов'язаних з нервовою системою, перевтоми, втраті концентрації.

4.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

Для безпечного використання електрообладнання у приміщенні згідно з ДСТУ 60204-1:2015 (Безпечність машин електрообладнання. Частина 1. Загальні вимоги) передбачено пристрій для централізованого вимикання електроживлення від усіх приладів. Усі електричні дроти під напругою надійно ізольовані та розташовані так, щоб унеможливити випадкове доторкання до них. Також для попередження ураження електричним струмом

всі працівники повинні знати правила з техніки безпеки при роботі з електричним обладнанням та пройти інструктаж.

Електричне заземлення виконується згідно ДСТУ Б В.2.5-82:2016 (Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом) та ПУЕ з опором контуру $\leq 4,0$ Ом.

Експлуатація електрообладнання повинна відповідати вимогам ПУЕ (“Правила експлуатації електроустановок”) та ДСТУ 60204-1:2015 (Безпечність машин електрообладнання. Частина 1. Загальні вимоги). Електричні установки та обладнання експлуатуються відповідно до “Правил технічної експлуатації електроустановок” (ПТЕ) та «Правилами технічної безпеки при експлуатації електроустановок споживачів» (ПТБ) з доповненнями й змінами.

Електробезпека обладнання яке використовується та вибір засобів захисту виконується згідно вимог які приведено у ДСТУ 7237:2011 (“Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту”).

Щоб попередити механічні травми необхідно забезпечити умови в яких робітники дотримуються правил безпеки на робочому місці, що передбачені у ДСТУ 7299:2013 (Дизайн та ергономіка. Робоче місце оператора. Взаємне розташування елементів робочого місця. Загальні вимоги ергономіки).

Треба правильно організовувати робочі місця, слідкувати за тим, щоб проходи та самі робочі місця були вільними від лишніх речей, що можуть заважати.

Для полегшення навантаження на нервову систему вводять перерви у роботі для відпочинку та фізичних вправ. Також це можна виконати періодичною зміною діяльності робітника.

4.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Шкідливість електромагнітного випромінювання обумовлене тривалою роботою людини у приміщеннях з великою кількістю електрообладнання, зокрема комп'ютерів. Це випромінювання може призводити до захворювань різного характеру у людини. Згідно ДСанПІН 3.3.2.007-98 («Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин») рекомендується використання дисплею комп'ютера на відстані не ближче ніж 50-70 сантиметрів до очей робітника. Тривалість роботи без перерв з комп'ютером повинна бути не більшою ніж 2 години. Захиститися від негативного впливу монітору можна використовуючи спеціальні фільтри, також необхідно сидіти на відстані не менше 1 метру від бічних та задніх стінок інших моніторів.

Погана ергономічність робочого місця, його неправильно організація та порушення порядку роботи може привести до захворювань нервової системи, кістково-м'язової системи, захворювання очей. Положення тіла також може негативно впливати на здоров'я при тривалому сидінні за комп'ютером. Для правильної організації роботи за персональним комп'ютером необхідно слідувати рекомендаціям з ергономіки згідно ДСТУ 7299:2013 (Дизайн та ергономіка. Робоче місце оператора. Взаємне розташування елементів робочого місця. Загальні вимоги ергономіки).

Недостатня кількість освітлення робочого місця, що обумовлюється виходом з ладу ламп освітлювання чи їх неправильною розташуванням може привести до захворювань органів зору або зниженню рівня зору. Робоче місце повинно бути розташовано так, щоб при сидінні за комп'ютером в поле зору не потрапляли інші освітлювальні прилади або природне світло згідно ДБН В.2.5-28-2006. «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення». Освітленість на робочій поверхні має становити 300-500 лк, при цьому освітлення слід розташовувати таким чином щоби не було

відблисків на поверхні монітору, а освітленість не перевищувала вказаний рівень у 300 лк.

Кліматичні умови що не відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042- 99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень») можуть бути викликані поганою чи недостатньою вентиляцією приміщення для роботи, поганим опаленням взимку чи охолодженням влітку. Такі умови можуть викликати собою низку захворювань органів дихання та значно погіршити загальний стан імунітету. Для нормального робочого процесу згідно (ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря санітарної зони» у виробничих приміщеннях, зокрема у приміщеннях обладнаних комп'ютерами треба забезпечувати оптимальні значення мікроклімату, а саме: вологість повітря у межах 40..60%, температура у межах +22..+24°C, швидкість руху повітря у межах 0,1..0,2 м/с , швидкість руху повітря у межах 0,1...0,2 м/с (ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря санітарної зони», рівень позитивних і негативних іонів у повітрі в межах 1,5...3 тис./см³ та 3...5 тис./см³ відповідно норм.

Згідно з НПАОП 0.00-7.15-18 (Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями) є неприпустимим розташування приміщень, які призначені для роботи з комп'ютеризованими робочими місцями у підвалах та цокольних поверхах. Також забороняється розташування вибухонебезпечних приміщень категорії А і Б та виробництв з мокрими технологічними процесами поряд з приміщеннями, де розташовуються комп'ютери, а також над такими приміщеннями, або під ними. Окрім того, виробничі приміщення для роботи з ВДТ не повинні межувати з приміщеннями, у яких рівень шуму і вібрації перевищує допустимі значення.

Визначимо необхідний опір штучного заземлювача.

При відсутності природних заземлювачів необхідний опір штучного заземлювача R беремо з табличного значення для електроустановок до 1000В, тобто 4 Ом.

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту за формулою:

$$\rho = \rho_{\text{ч}} \cdot \Psi, \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (4.1)$$

де $\rho_{\text{ч}}$ – питомий опір землі (Чорнозем) 20 Ом·м;

Ψ – коефіцієнт сезонності який вибрано з табличних значень для I кліматичної зони та нормальної вологості та стрижня 3 метри.

$$\rho = 20 \cdot 1.7 = 34 \text{ Ом}.$$

Обчислимо опір розтікання струму одиночного вертикального заземлювача $R_{\text{в}}$, Ом. Для стрижневого заземлювача круглого перерізу, заглибленого в ґрунт (рисунок 4.1), розрахункова формула 4.2 має вигляд:

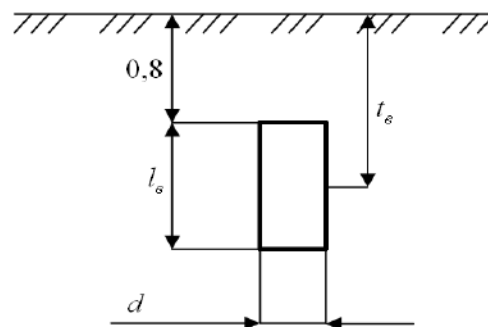


Рисунок 4.1 – Схема залягання стрижневого трубчастого заземлювача

$$R_{\text{в}} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{в}}} \left(\ln \frac{2 \cdot l_{\text{в}}}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot t_{\text{в}} + l_{\text{в}}}{5 \cdot t_{\text{в}} - l_{\text{в}}} \right), \text{ Ом}. \quad (4.2)$$

де ρ – розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом·м;

$l_{\text{в}}$ – довжина вертикального стрижня, м;

d – діаметр перерізу стрижня, м;

t_g – відстань від поверхні ґрунту до середини довжини вертикального стрижня.

Відстань від поверхні ґрунту до середини довжини вертикального стрижня обчислюється за формулою:

$$t_g = 0,8 + \frac{1}{2} l_g, \quad (4.3)$$

$$t_g = 0,8 + \frac{1}{2} * 3 = 2.3 \text{ м.}$$

$$R_g = \frac{34}{2 \cdot \pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,01} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2 \cdot 3 + 3}{5 \cdot 2 \cdot 3 - 3} \right) = 1.8(6,39 + 0.5 * 0.96) = 12.37 \text{ Ом.}$$

Розрахуємо наближену (мінімальну) кількість вертикальних стрижнів

$$n' = \frac{R_g}{R_u}, \text{ шт.} \quad (4.4)$$

де R_g – опір розтікання струму одиночного вертикального заземлювача;
 R_u – необхідний опір штучного заземлювача, Ом.

$$n' = \frac{12,37}{4} = 3.09, \text{ шт.}$$

Якщо виходити з розмірів контуру:

$$n = \frac{P}{a}, \text{ шт.} \quad (4.5)$$

де P – периметр прямокутника (приміщення).

Який визначається за формулою:

$$P = 2 \cdot (L + B), \text{ м.} \quad (4.6)$$

де L – довжина приміщення, м;
 B – ширина приміщення, м;
 a – відстань між стрижнями, обумовлена зі співвідношення.
Відстань між стрижнями буде дорівнювати:

$$a = k \cdot l_{\text{с}}, \quad (4.7)$$

де $l_{\text{с}}$ – довжина вертикального стрижня, м;
 k – коефіцієнт кратності, який дорівнює 1, 2, 3 (для заглиблених стаціонарних заземлювачів $k=1$).

$$a = 1 \cdot 3 = 3.$$

$$P = 2 \cdot (3 + 5) = 16 \text{ м.}$$

$$n = \frac{16}{3} = 5,33 \text{ шт.}$$

Отриману кількість стрижнів округляємо до більшого довідкового значення, з умовою щоб вона була не менше ніж n' , тобто приймаємо кількість за 5 штук.

Визначаємо довжину горизонтальної смуги при конфігурації групового заземлювача – контур:

$$l_{\text{с}} = 1,05 \cdot a \cdot n, \text{ м.} \quad (4.8)$$

де n – кількість вертикальних стрижнів;
 a – відстань між вертикальними стрижнями, м.

$$l_{\text{с}} = 1,05 \cdot 3 \cdot 5,3 = 16,7 \text{ м.}$$

Обчислимо опір розтікання струму горизонтальної з'єднуючої смуги R_z , Ом. У випадку горизонтального смугового заземлювача (рисунок 4.2) розрахунок виконується за формулою 4.9.

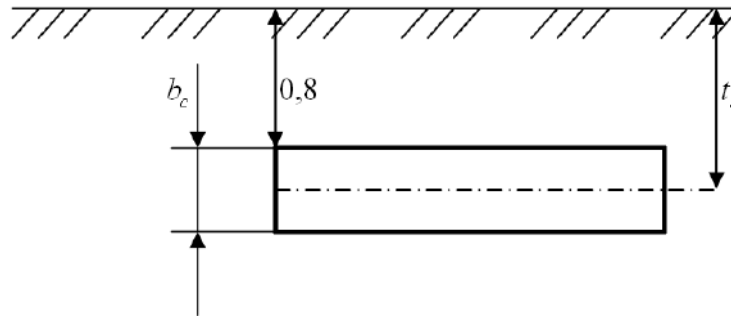


Рисунок 4.2 – Схема горизонтального смугового заземлювача

$$R_z = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_z} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_z^2}{b_c \cdot t_z}, \text{ Ом.} \quad (4.9)$$

де ρ – розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом·м;

l_z – довжина горизонтальної смуги, м;

b_c – ширина смуги, м;

t_z – відстань від поверхні ґрунту до середини ширини горизонтальної смуги.

Відстань від поверхні ґрунту обчислюється за формулою:

$$t_z = 0,8 + \frac{1}{2} b_c, \text{ м.} \quad (4.10)$$

$$t_z = 0,8 + \frac{1}{2} 0,03 = 0,815 \text{ м.}$$

$$R_z = \frac{34}{2 \cdot \pi \cdot 16,7} \cdot \ln \frac{2 \cdot 16,7^2}{0,03 \cdot 0,815} = 0,32 \cdot 9,62 = 3,08 \text{ Ом.}$$

Розрахувати еквівалентний опір розтіканню струму групового заземлювача.

$$R_{zp} = \frac{R_6 \cdot R_z}{R_6 \cdot \eta_z + R_z \cdot \eta_6 \cdot n}, \text{ Ом.} \quad (4.11)$$

де R_6 – опір розтікання струму одиночного вертикального заземлювача, Ом;

R_z – опір розтікання струму горизонтальної смуги, Ом;

η_6, η_z – коефіцієнти використання вертикальних стрижнів і горизонтальної смуги, Ом;

n – кількість вертикальних стрижнів.

$$R_{zp} = \frac{12.37 \cdot 3.08}{12.37 \cdot 0.425 + 3.08 \cdot 2 \cdot 5.33} = \frac{38.0996}{5.25 + 32.83} = 1.0 \text{ Ом.}$$

Отриманий опір розтіканню струму групового заземлювача відповідає нерівності

$$R_{zp} \leq R. \quad (4.12)$$

$$1 \leq 4.$$

4.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

Заходи з пожежної безпеки.

Однією з найбільш важливих задач пожежної профілактики є захист будівельних конструкцій від руйнування і забезпечення їхньої достатньої міцності в умовах впливу високих температур при пожежі. У залежності від меж вогнестійкості будівельних конструкцій частин будинків іншого призначення, у яких передбачене розміщення ЕОМ, запроектований II ступень вогнестійкості згідно ДБН В.1.1-7:2016 (Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги).

Обладнання лабораторії відповідає вимогам Правил пожежної безпеки в Україні, оскільки виконано відповідно до ПУЕ та ДСТУ Б В.2.5-82:2016 (Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом).

Для своєчасного виявлення загоряння та слідкуючих за ним пожеж у приміщенні треба встановлювати систему автоматичної сигналізації з димовими сповіщувачами. Для швидкого ліквідування невеликого загоряння у приміщенні повинні бути вуглекислотні вогнегасники ВВК-1.4. А для ефективного ліквідування більш обширного загоряння треба наявність пожежних кранів у коридорах, на сходах або біля входів (у нішах).

Наслідками загоряння можуть бути опіки тіла різного ступеня тяжкості або отруєння чадним газом. Тому треба якнайшвидше покинути приміщення чи будівлю у якій сталася пожежа. У цей момент дуже важливими є дії персоналу. Неправильні дії персоналу в умовах пожежі виникають внаслідок недотримання правил евакуації з палаючого приміщення, та призводять до виникнення паніки та давки серед людей, що евакуюються, що в свою чергу негативно вплине на загальний час евакуації.

Безпека евакуації досягається тим, що тривалість евакуації людей з окремих приміщень і будівель не перевищує критичної тривалості пожежі, що становить небезпеку. Критичною тривалістю пожежі є час досягнення пожежі небезпечних для людини температур і зменшення вмісту кисню в повітрі. В усіх будівлях і спорудах на випадок пожежі повинна бути передбачена і забезпечена евакуація людей з приміщень через евакуаційні виходи.

Виходи можуть вважатися евакуаційними, якщо ведуть з приміщень:

- а) першого поверху назовні безпосередньо, або через коридор, чи вестибюль;
- б) будь-якого поверху, крім першого, у коридорах, що ведуть на сходову клітку, у тому числі через хол. При цьому клітки повинні мати вихід

назовні безпосередньо або через вестибюль, відокремлений від прилеглих коридорів перегородками дверями;

в) до сусіднього приміщення на цьому ж поверсі, забезпечене виходами, вказаними у пунктах вище.

Евакуаційні виходи повинні розташовуватися розосереджено. Мінімальна відстань між найвіддаленішими евакуаційними виходами з приміщення визначається за формулою:

$$l = 1.5 * \sqrt{P}, \quad (4.13)$$

де P – периметр приміщення м.

Кількість евакуаційних виходів з будівель, кожного поверху та приміщень необхідно приймати зважаючи на ДБН В 1.1-7-2002, однак не менше двох. Слід зазначити, що існує ряд винятків, коли допускається один евакуаційний вихід або використання як другого виходу інших пристосувань для евакуації, зокрема зовнішньої пожежної металеві драбини. Не допускається влаштовувати евакуаційні виходи через приміщення категорій А і Б, а також через виробничі приміщення в будівлях ступеня вогнестійкості ІІб, IV, IVa та V. Відстань від найвіддаленішого робочого місця до найбільшого евакуаційного виходу з приміщення безпосередньо назовні або на сходову клітку не повинна перевищувати значень, регламентованих СНиП 2.09.02-85.

Ширину евакуаційного виходу (дверей) із коридору назовні або на сходову клітку необхідно приймати залежно від загальної кількості людей, які евакуюються через цей вихід, і кількості людей на 1 м ширини виходу (дверей), але не менше 0,8 м.

Ширину сходового маршу необхідно приймати не менше розрахункової величини евакуаційного виходу (дверей) з поверху з найширшими дверима на сходову клітку, тобто не менше 1 м.

Евакуаційні шляхи мають забезпечувати безпечну евакуацію людей, які перебувають у приміщеннях будівель і споруд, протягом необхідного часу евакуації.

Розрахунковий час евакуації людей з приміщень і будівель визначають, виходячи з довжини евакуаційного шляху та швидкості руху людського потоку на всіх відрізках шляху від найвіддаленіших місць до евакуаційних виходів. Розрахунковий час евакуації повинен бути менший за необхідний час евакуації людей.

Будівлі висотою 10-20 метрів обладнуються вертикальними зовнішніми металевими сходами (драбинами) шириною 0,6 м. При висоті будівель понад 20 м влаштовуються похилі пожежні сходи шириною 0,7 м з нахилом не більше 6:1 та проміжними майданчиками, що розташовуються поблизу вікна не менше як через 8 м по висоті.

Пожежні сходи розташовуються на відстані по периметру будівлі не більше 200 м.

Заходи з цивільної оборони.

Мета дослідження стійкості об'єкта є у тому щоб виявити уразливі місця в роботі об'єкта у воєнний час і виробити найбільш ефективні методи і рекомендації, які будуть спрямовані на підвищення його стійкості. Надалі ці рекомендації будуть включаються в план заходів щодо підвищення стійкості роботи об'єкта.

Дослідження стійкості підприємства проводиться силами інженерно-технічного персоналу з залученням фахівців науково-дослідних і проектних організацій, пов'язаних підприємством. Організатором і керівником дослідження є керівник підприємства (начальник ЦО об'єкта).

Процес дослідження можна розділити на такі три етапи: перший – процес підготовки, другий – оцінка стійкості роботи об'єкта в умовах воєнного часу, третій – розробка заходів які підвищать стійкість роботи об'єкта.

На першому етапі розробляються управлінні документи, визначається склад учасників дослідження й організується їхня підготовка.

Основними документами для організації дослідження стійкості роботи об'єкта є: наказ начальника підприємства, календарний план основних заходів для підготовки до проведення дослідження; план для проведення дослідження.

За наказом директора підприємства (керівника дослідження) розробляється план, на підставі вказівок старшого начальника з урахуванням особливостей і конкретних умов, що пов'язані із виробничою діяльністю об'єкта. У наказі вказуються: мета та задачі майбутнього дослідження, час проведення робіт, склад учасників та задачі груп, терміни до готовності документації.

Календарний план підготовки перед проведенням самого дослідження визначає основні заходи і терміни їх проведення, відповідальних виконавців, сили та засоби, що будуть задіяні у поставлених задачах.

План проведення досліджень стійкості роботи об'єкта є основним документом, що визначає роботу керівника дослідження і дослідницьких груп фахівців. У плані вказують: тему, мету та тривалість дослідження, склад слідчих груп і зміст їх роботи, порядок досліджень.

Також створюється група штабу ЦО об'єкта, в яку входять начальники служб оповіщення і зв'язку, протирадіаційного та протихімічного захисту сховищ і ПРУ, медична охорона, охорони суспільного порядку, матеріально-технічного постачання.

У підготовчий період з керівниками дослідницьких груп проводяться спеціальні заняття, на яких керівник підприємства доводить до підлеглих план роботи попереду, ставить задачу кожній групі та визначає терміни проведення дослідження.

На другому етапі проводиться безпосереднє дослідження стійкості роботи об'єкта у воєнний час.

Під час дослідження визначаються умови захисту робітників та службовців від зброї масового ураження, оцінюється стійкість виробництва при впливі на нього вражаючих факторів ядерного вибуху, визначається характер можливого ураження від вторинних вражаючих факторів, визначається стійкість системи постачання та зв'язків об'єкту з підприємствами-постачальниками і зв'язки зі споживачами, виявляються уразливі місця в системі керування виробництвом.

Кожна група фахівців оцінює стійкість визначених елементів виробничого комплексу і робить необхідні висновки.

На третьому етапі підводяться підсумки проведених досліджень. Групи фахівців із результатів досліджень готують доповіді, у яких подають висновки і пропозиції по захисту робітників та службовців і підвищенню стійкості оцінюваних елементів виробництва. До доповідей додаються необхідні таблиці, схеми, плани.

Правильність проведених розрахунків і реальність вироблених пропозицій і рекомендацій перевіряються на спеціальному навчанні тривалістю 2-3 доби, проведеному під керівництвом начальника ЦО об'єкта чи старшого начальника.

ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі за допомогою Ansys HFSS було розглянуто різноманітні варіанти покращення характеристик антени, а саме: додавання директорів, оптимізація розміру рефлектора, зміна відстані між директорами, зміна відстані між вібратором та директором. Було проведено порівняння характеристик антени без модифікацій та модифікованого варіанту.

Провівши моделювання роботи антени у діапазоні частот 700-3800 МГц та проаналізувавши отримані характеристики прийшли до висновку що робочим діапазоном антени є 1700-2700 МГц, що включає в себе діапазони 1800, 2100, 2300, 2600.

Оцінивши робочий діапазон спробували оптимізувати розміри рефлектора за допомогою функції Optimetrics, після аналізу отриманих даних прийшли до висновку, що заводський варіант з рефлектором шириною та висотою у 192 міліметри не є оптимальним. Оптимальним буде розмір у 240 міліметрів, який дозволить зменшити небажані бічні та задню пелюстку, а у прямому напрямку, навпаки, збільшити. Також збільшення рефлектору позитивно вплине на рівень SINR, що досить суттєво вплине на швидкість у складних умовах приймання сигналу. Коефіцієнти підсилення на частотах вивантаження (uplink) для відповідних діапазонів після збільшення розміру рефлектора: 1750 МГц (1800) – 12.39дБ (+0.76), 1950 МГц (2100) – 13.08 дБ (+0.64), 2530 МГц (2600) – 15.33дБ (+0.28). Коефіцієнти підсилення на частотах завантаження (downlink) для відповідних діапазонів після збільшення розміру рефлектора: 1840 МГц (1800) – 12.72дБ (+0.7), 2140 МГц (2100) – 13.23дБ (+0.36) , 2655 МГц (2600) – 15.62дБ (+0.37).

Далі спробували оптимізувати відстань між сусідніми вібраторами та директорами, заводська відстань була рівною 85 міліметрів, спробувавши змінити відстань на ± 5 мм прийшли до висновку, що заводська відстань 85мм є найоптимальнішим варіантом, якщо нам треба забезпечити прийнятну

роботу антени у діапазонах частот від 1700 до 2700 МГц. При відстані у 80мм завал кривої підсилення стається приблизно на 2800 МГц і через це у діапазоні 2600 МГц є невеликий недобір підсилення у порівнянні з варіантом відстані у 85мм. У випадку коли відстань дорівнює 90мм завал кривої починається раніше ніж 2700 МГц, що для нас є абсолютно неприйнятним через зменшення підсилення для частот діапазону 2600 МГц.

Наступним кроком спробували оптимізувати відстань між директором та вібратором яка з заводу дорівнює 25мм. Провели аналіз за допомогою Optimetrics для діапазону від 20ти до 20ти мм. Отримали результати у яких для відстані 20-24 міліметри на частотах близьких до 2700 МГц відбувається недобір підсилення, що є неприйнятним. На відстані 28-30 міліметрів завал по підсиленню відбувається раніше потрібного порогу у 2700 МГц, що також не задовольняє поставлені нами умови. Відстань 25-26 мм є найоптимальнішою, дозволяє уникнути завал підсилення до 2700 МГц та дозволяє отримати найкращий максимальний рівень коефіцієнту підсилення. Тому прийшли висновку, що змінювати відстань не має сенсу та її слід залишити рівною 25 міліметрів.

Далі додали до антени директори, додавати по одному директору та аналізувати кожний крок було дуже затратно по часу та не ефективно, тому взяли модель готової антени типу «хвильовий канал» під комерційною назвою «BDM2» та додали 5 оптимізованих директорів на нашу антену. У результаті отримали покращення підсилення у діапазоні 1700-2600 МГц на більше ніж децибел майже на всьому діапазоні частот, що є дуже хорошим результатом. Але на відрізку 2600-2700 МГц отримали різкий завал підсилення. Далі було з'ясовано, що видаливши лінії живлення для другого порту MIMO (таким чином зробивши антену з одним портом (SISO)) завал зменшився на 0.79дБ, можна зробити висновок, що це сталося через взаємодію ліній живлення антени з директорами.

Останнім етапом було проведено аналіз отриманих характеристик антени з усіма модифікаціями, та антени до модифікацій. Отримали такі

коефіцієнти підсилення на частотах вивантаження (uplink) для відповідних діапазонів: 1750 МГц (1800) – 13.76 дБ (+2.13), 1950 МГц (2100) – 12.44дБ (+2.33) , 2530 МГц (2600) – 16.29дБ (+1.24).

Коефіцієнти підсилення на частотах завантаження (downlink) для відповідних діапазонів отримали наступні: 1840 МГц (1800) – 14.08 дБ (+2.06), 2140 МГц (2100) – 14.96дБ (+2.09) , 2655 МГц (2600) – 15.49дБ (+0.24). Після оптимізації отримали дещо кращий КСХ, який є дуже хорошим результатом для антени побутового призначення.

Порівняно з оригінальною антеною у модифікованого варіанту отримали дещо гіршу ізоляцію портів МІМО, але вона знаходиться на прийнятному рівні для антен побутового призначення. Після порівняння оригінальної та модифікованої антени можна побачити що діаграмі спрямованості для частот 1750 та 2150 МГц стала дещо кращою, а для 2650 МГц вона майже не змінилася. Для всіх діапазонів частот діаграма спрямованості відповідає вимогам якісно виконаних та узгоджених антен.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Марков Л.Н. Антенные системы радиоэлектронной техники [Текст] / Л.Н. Марков, А.И. Долбик. – М.: Воениздат, 1993. – 368 с.
2. Ямайкин В.Е. Антенные устройства [Текст] / В.Е. Ямайкин, В.Ф. Северьянов, В.К. Кишкунов, А.В. Рунов. – М.: МВИЗРУ ПВО, 1965. – 529 с.
3. Технологія MIMO [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://anisimoff.org/lte/general/mimo.html>
4. Port Isolation Method for MIMO Antenna in Small Terminals for Next Generation Mobile Networks [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6093119>
5. LTE-Advanced [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://anisimoff.org/lte/lte-advanced%20overview.html>
6. LONG TERM EVOLUTION (LTE) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.etsi.org/technologies/mobile/4g>