

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна  
Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем  
Кафедра фізики НВЧ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедру**

\_\_\_\_\_ Сергій ПОГАРСЬКИЙ

підпис ініціали, прізвище

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

## **Кваліфікаційна робота**

### **магістра**

на тему:

**МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ЦИРКУЛЯТОРА НА ОСНОВІ  
СМУЖКОВОЇ СТРУКТУРИ**

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-64  
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,  
освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»



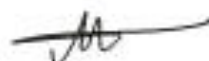
**Олександр ЧЕРКАСЬКИЙ**

Керівник

кандидат фіз.-мат. наук,

доцент

**Дмитро МАЙБОРОДА**



2024 рік

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить 23 рис., 45 стор., 21 бібліографічних посилань.

Проаналізовано сучасний стан розвитку функціональних пристроїв НВЧ діапазону. Розглянуто методи розрахунку параметрів особливого класу пристроїв – циркуляторів.

За допомогою програмного забезпечення ANSYS HFSS Electronics Desktop проведено конструювання моделі та чисельне моделювання параметрів трьох-портового циркулятора НВЧ на смужкових елементах.

Визначені залежності S-параметрів матриць зворотних втрат, та ізоляції на всіх портах заданого пристрою. Визначено діапазон роботи, скориговані геометричні розміри та параметри феритової підкладки відповідно до оптимальної робочої частоти. Виходячи з отриманих результатів можна стверджувати про достатню простоту конструкції, її технологічність та перспективи використання.

Отримані результати можуть бути використані при розробці сучасних пристроїв у надвисокочастотних діапазонах.

**СМУЖКОВИЙ ЦИРКУЛЯТОР, ФЕРИТОВА ПІДКЛАДКА, ФУНКЦІЯ ГРІНА, САПР.**

## **ABSTRACT**

The master's thesis contains 23 figures, 45 pages, 21 bibliographic references.

The current state of development of functional microwave devices is analyzed. The methods of calculating the parameters of a special class of devices - circulators - are considered.

The model design and numerical simulation of the parameters of a three-port microwave circulator on strip elements were carried out using the ANSYS HFSS Electronics Desktop software.

The dependences of the S-parameters of the return loss matrices and the isolation on all ports of a given device were determined. The range of operation is determined, the geometric dimensions and parameters of the ferrite substrate are adjusted in accordance with the optimal operating frequency. Based on the results obtained, it can be stated that the design is simple enough, its manufacturability and prospects for use.

The obtained results can be used in the development of modern devices in the ultra-high frequency ranges.

**STRIP CIRCULATOR, FERRITE SUBSTRATE, GREEN FUNCTION, SAPR.**

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ПОБУДОВИ СМУЖКОВИХ ЦИРКУЛЯТОРІВ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ.....	7
1.1. Принцип побудови та роботи циркуляторів.....	8
1.2. Різновиди циркуляторів НВЧ.....	16
РОЗДІЛ 2. КЛАСИЧНА ТЕОРІЯ ТРЬОХПОРТОВОГО ЦИРКУЛЯТОРА.....	19
2.1. Різновиди трикутних конфігурацій циркуляторів.....	21
2.2. Класична теорія циркуляторів.....	22
РОЗДІЛ 3. МЕТОД ФУНКЦІЇ ГРІНА ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ЦИРКУЛЯТОРІВ НВЧ.....	24
3.1. Модель Гріна і Сендлі.....	25
3.2. Вплив геометрії фериту на розмагнічування та сумарне внутрішнє поле $H_0$ .....	27
3.3. Метод еквівалентних схем для розрахунку параметрів циркуляторів НВЧ.....	29
3.4. Метод часткових областей.....	32
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ЦИРКУЛЯТОРА НВЧ В САПР.....	34
ВИСНОВОК.....	42
ЛІТЕРАТУРА.....	43

## ВСТУП

Феритові циркулятори є ключовими елементами в новітній мікрохвильовій інженерії. Широкого розповсюдження ці пристрої набули у радіотехнічних галузях через свою компактність та зручність у використанні.

Циркулятор НВЧ - це пасивний електромагнітний пристрій, що дозволяє направляти сигнал в одному напрямку між кількома портами. Його основне застосування полягає у розподілі або об'єднанні сигналів, а також в запобіганні взаємних завад між пристроями в радіочастотних системах [1].

Для пошуку параметрів циркуляторів використовуються метод функції Гріна або метод еквівалентних схем, ці методи дозволяють більш широко дослідити такі пристрої і знайти всі необхідні електродинамічні параметри. Цікавою також є можливість дослідити різні типи та види матриць циркуляторів, їх взаємодію між собою в залежності від їх виду за допомогою цих методів.

Задачі зі знаходження параметрів циркулятора можуть бути розв'язані за допомогою класичних рівнянь Максвелла, спростивши їх за допомогою декількох методів, описаних вище. Моделювання параметрів в програмах САПР є ключовим для дослідження та наочного підтвердження теоретичних відомостей.

Циркулятори НВЧ відіграють ключову роль у сучасних радіочастотних системах, забезпечуючи ефективний розподіл сигналу і захист від завад. Їх принцип роботи заснований на ефекті Фарадея, що забезпечує однонаправлену передачу сигналу, яка знаходить широке застосування в телекомунікаціях і радіолокації [2].

Феритові циркулятори та ізолятори є ключовими елементами в сучасній мікрохвильовій техніці. Їх фундаментальна властивість невзаємності, здатна спростити конструкцію і підвищити стабільність, ефективність та точність радара, систем зв'язку та вимірювання.

Процедура проектування класичних смужкових ізоляторів стала відомою із середини 1960-х років.

Перше повне теоретичне обґрунтування циркуляторів було дане у роботах Л. А. Гиртака, які стали базовими для подальшого розвитку цієї області. У його працях розглянуто гіромагнітний ефект у феритових матеріалах, який використовується для реалізації принципу одностороннього пропускання сигналу в НВЧ пристроях [3].

У його класичних дослідженнях була детально описана магнітна взаємодія в феритах, що дозволило використовувати їх для створення циркуляторів та ізоляторів. Також було введено поняття тривимірних циркуляторів, що дозволило розширити їх застосування у багатопортових системах. Авторами запропоновано розглядати Y-перехід як невзаємний резонатор, що працює з двома режимами протилежного обертання. Теорія циркуляційного з'єднання з використанням трикутних резонаторів була оброблена з припущенням про магнітні стінки і знехтуванням полів, що їх оточують.

Метою кваліфікаційної роботи було:

- узагальнення та систематизація знань, набутих з відповідних джерел, щодо фізичних принципів роботи циркуляторів (ізоляторів);
- визначення базових параметрів та величин, що характеризують такого роду пристроїв;
- систематизація знань щодо обраної обчислювальної платформи ANSYS HFSS;
- побудова моделі смужкового циркулятора НВЧ на базі САПР ANSYS HFSS;
- проведення чисельного моделювання;
- аналіз результатів;

## РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ПОБУДОВИ СМУЖКОВИХ ЦИРКУЛЯТОРІВ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ

Взаємність — це загальний принцип, що регулює факт, коли передача сигналу між двома точками в просторі є ідентичною в обох напрямках, незалежно від складності проміжного каналу. Цей принцип застосовується до широкого спектру матеріалів за умови, що вони є негіротропними, пасивними, лінійними та незмінними в часі. Зміна будь-якої з цих умов дозволяє реалізувати компоненти, такі як циркулятори, ізолятори та гіратори, які мають численні застосування в сучасних системах зв'язку.

Циркулятори є невзаємними пристроями, тобто характеристики передачі сигналу різні в протилежних напрямках. Така невзаємна поведінка досягається завдяки використанню феритових матеріалів і зовнішніх магнітних полів [2-3].

Для визначення параметрів ізолятора потрібні параметри ізоляції, КСХН та внесених втрат, тоді як для циркулятора повністю визначається лише КСХН трьох портів і його внесеними втратами. Хоча і циркулятор можна зробити ізолятором, закривши один порт, таким чином, він не матиме значення внутрішньої ізоляції. Вимірювана ізоляція залежить від КСХН кінцевого навантаження та портів циркулятора.

Останнім часом значну увагу приділяють до безмагнітних реалізацій таких пристроїв на основі лінійних періодично змінних у часі схем, оскільки вони здатні вирішити проблеми ваги, розміру та вартості магнітних пристроїв, водночас задовольняючи необхідні вимоги [4-5].

Феритові матеріали доступні в багатьох формах. Традиційним методом виробництва феритів є спікання суміші порошоків оксиду металу (МО) і оксиду заліза ( $Fe_2O_3$ ), де М є двовалентним металом, таким як магній або цинк. Потім отримана суміш може бути представлена загальною хімічною формулою  $MOFe_2O_3$ . Цей метод виготовлення використовується для

отримання об'ємного феритового матеріалу для використання в ряді пасивних мікрохвильових пристроїв, таких як металеві хвилеводні ізолятори і циркулятори, а також для виробництва феритових шайб для поверхневого монтажу в гібридних мікрохвильових інтегральних схемах [5].

Завдяки прогресу у виробничих технологіях ферит тепер доступний у широкому діапазоні форматів для планарних схем. Можливе нанесення тонких плівок і пасти для плівкового друку. Тепер можна виготовляти феритові підкладки з низькими втратами та дуже низькими жорсткостями поверхні. Зовсім недавно феритові стрічки були виготовлені для використання в багатошарових структурах LTCC.

Циркулятори проєктуються за певними приблизними правилами, які добре відомі, але специфічні для смужкових циркуляторів. Внаслідок цього для копланарного циркулятора необхідна оптимізація початкового проєкту перед отриманням функціонального пристрою. Дизайн і S-параметри базуються на теоретичних результатах, отриманих для смужкової структури. Ці результати потім переносяться на копланарний дизайн після числового аналізу [6].

### **1.1. Принцип побудови та роботи циркуляторів**

Пристрої містять феритовий сердечник, який знаходиться під впливом статичного магнітного поля. Це поле орієнтує спіни електрона всередині фериту для створення гіромагнітного ефекту. Невзаємність виникає, коли радіочастотний сигнал взаємодіє з електронами, щоб створити структуру стоячої хвилі всередині ядра.

Вентиль на рисунку 1(а) являє собою пасивний невзаємний 2-полюсний пристрій, який дозволяє енергії сигналу проходити через нього вперед, поглинаючи енергію у зворотному напрямку.

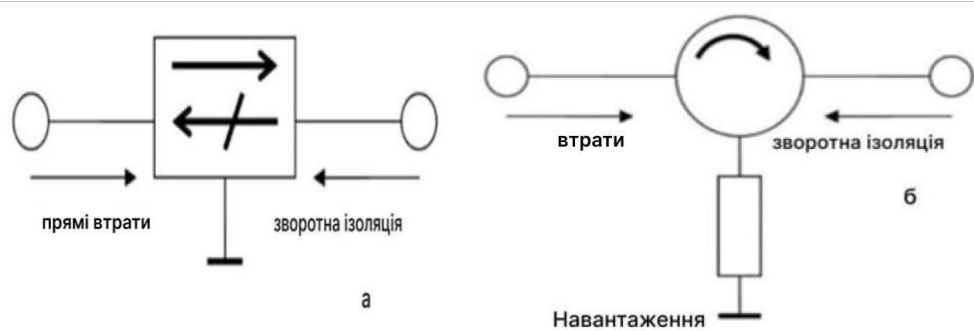


Рисунок 1.1 Схеми пасивних циркуляторів.

Циркулятор є пасивним невзаємним пристроєм з 3 або більше портами. Енергія, введена в перший порт передається на другий порт, в той час як інші порти ізолювані.

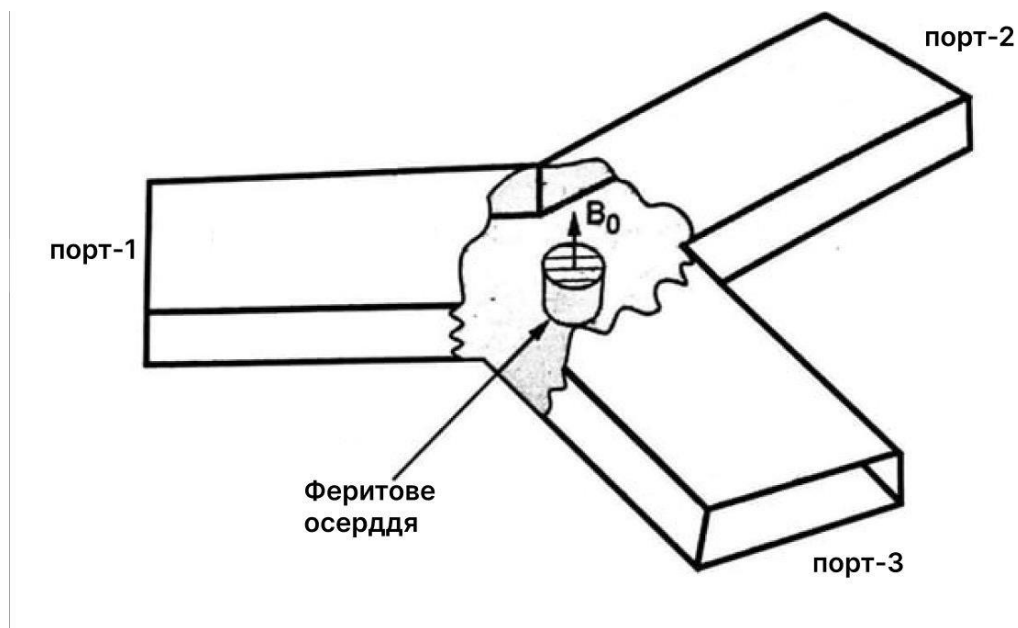


Рисунок 1.2 Будова стандартного циркулятора.

Базовий мікрохвильовий циркулятор (рисунок 1.2) - це узгоджений трипортовий пристрій, в якому сигнали, що подаються на один порт, циркулюють навколо і виходять тільки з одного з двох сусідніх портів. У циркуляторі, показаному на рисунку 1 (б) , напрямок циркуляції - за годинниковою стрілкою, тому сигнали, подані на порт 1, виходять на порт 2,

сигнали, подані на порт 2, виходять на порт 3, а сигнали, подані на порт 3, виходять на порт 1 [7].

Існує багато застосувань циркуляторів у мікрохвильових системах зв'язку, і одна з відомих схем полягає у використанні циркулятора для того, щоб передавач і приймач мали спільну антену.

У схемі, показаній на рисунку 1.3, вихідна потужність передавача подається на антену, а невзаємні властивості циркулятора означають, що вихідний каскад передавача захищений від відбиття, спричинених не узгодженою антенною. Крім того, чутливий вхід приймача захищений від відносно високої вихідної потужності передавача, оскільки немає передачі від порту 1 до порту 3.

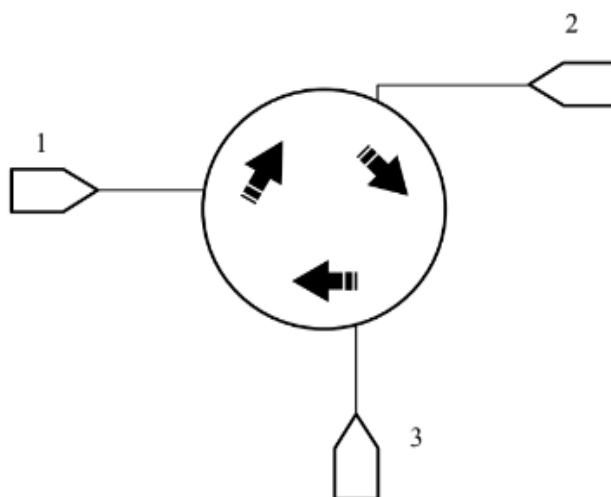


Рисунок 1.3 Схема роботи циркулятора.

Як показано на рисунку 1.3, коли сигнал надходить на порт 1, він буде доставлений на порт 2 але не до порту 3, порт 3 ізольовано від порту 1. Коли сигнал надходить у порт 2, він буде доставляється до порту 3, але не до порту 1, порт 1 ізольований від порту 2 навпаки. Стрілки показують напрямок потоку сигналу, у цьому випадку – за годинниковою стрілкою.

Така поведінка призводить до ідеальної S-матриці для трьохпортового циркулятора. Циркулятор в більшості випадків має 3 порта. В ідеальному випадку трьохпортовий циркулятор описується наступною матрицею:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Основними параметрами циркулятора є:

- Внесені втрати.
- Зворотна ізоляція.
- Смуга пропускання та центральна частота.
- Керування потужністю.
- Коефіцієнт шуму (для приймального тракту).
- Лінійність.
- Розмір, вага та вартість.

Щоб задовольнити попит на швидке зростання мікрохвильових систем зв'язку, конструкція циркуляторів повинна базуватися на нових матеріалах (ферити з низькою температурою спікання, гексаферити), нових технологіях (LTCC, 3D-друк) та засобах прогнозного ЕМ моделювання.

Завдяки своїй складній природі (невзаємності, анізотропним властивостям магнітності матеріалу, неоднорідній конфігурації, тощо), конструкція циркуляторів, які відповідають умовам зменшення розмірів з хорошими характеристиками електромагнітних процесів, вимагає кращого розуміння задіяних фізичних процесів. Це потребує розробки нових теоретичних інструментів для прогнозу динамічної поведінки феритових пристроїв.

Звичайні циркулятори вимагають сильних магнітних полів для зміщення фериту, вбудованого в пристрій. В цих полях зміщення створюються постійними магнітами, які збільшують розмір і вартість цих пристроїв. Для зменшення розмірів циркуляторів при розробці конструкцій використовують планарні технології (наприклад, мікросмужкові) або попередньо орієнтовані матеріали, щоб уникнути використання постійних магнітів. Для мікросмужкових циркуляторів використовується тільки один магніт для

поляризації матеріалу. Такі магніти збільшують неоднорідність зміщення постійного струму полів у феритових матеріалах.

Основною властивістю циркулятора є його невзаємність, яка може бути використана для розділення падаючої та відбитої хвиль. Серед різних характеристик, ізоляція є найбільш критичною.

Звичайний пасивний циркулятор виготовляється з феритового матеріалу на основі незворотної характеристики гіромагніту, який є громіздким і важким, не сумісним з технологією монолітної інтеграції, робить його дорогим рішенням для сучасних систем трансивера [8].

Щоб подолати недолік, було розроблено кілька активних циркуляторів, як невід'ємне рішення з невеликим розміром, малою вагою та низькою вартістю, сумісних з сучасною технологією ІС [8-9].

Автори довели можливість реалізації активних циркуляторів з транзисторами, використовуючи «односторонню» характеристику транзисторів, а також ввели умови для циркуляції сигналу та зміни імпедансу низької частоти .

Для застосування трансивера потрібні лише два порти сигналу. Крім того, потужність та шум є додатковими проблемами для сигналу, що циркулює в активному циркуляторі.

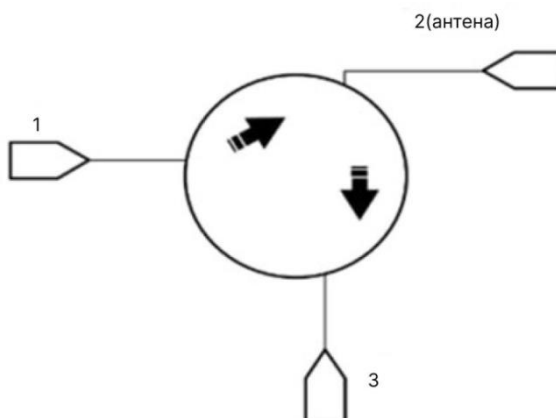


Рисунок 1.4 Принцип роботи активного кватзіциркулятора.

Якщо поглянути на рисунок 1.4 , можна зрозуміти, що квазіциркулятор є нічим іншим як звичайним циркулятором, в якого відсутній потік енергії від виходу 1 до виходу 3. Матриця такого циркулятора має в ідеалі виглядає наступним чином:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Три квазіциркулятори можуть утворювати повний циркуляційний контур у кільці конфігурації за рахунок більшої площі чіпа.

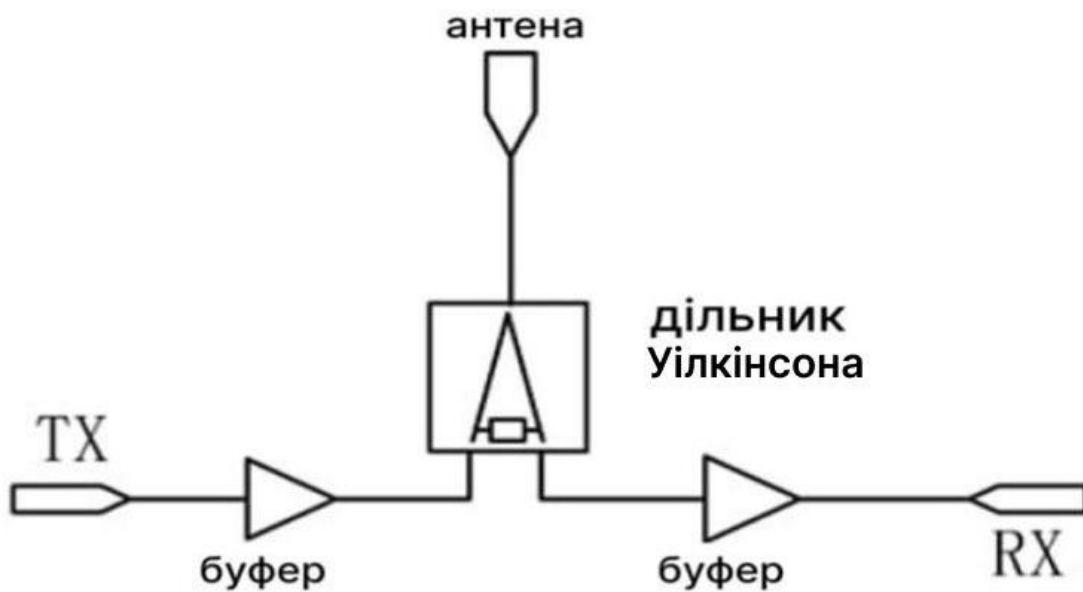


Рисунок 1.5 Дільник Вілкінсона.

Розділювачі потужності є одним з пасивних компонентів, що використовуються в розподілені антенні системи. Також відомі як дільники потужності, розгалужувачі, рівномірно розділяють радіочастотний сигнал навпіл, які дозволяють підключати 2 або більше антен до одного джерела радіочастотного сигналу. Розділювачі доступні у двох типах: реактивний та резистивний тип Вілкінсона, що продемонстрований на рисунку 1.5 [10].

Розгалуджувачі типу «Wilkinson» є більш компактними та забезпечують кращу ізоляцію між портами. Розділювачі реактивної потужності пропонують вищу номінальну потужність. Крім того, активний циркулятор має можливість забезпечувати посилення сумісності із сучасною інтеграцією процесів, активний квазіциркулятор є хорошою заміною пасивного циркулятора в низькопотужних недорогих трансиверах.

Вище описаний циркулятор з Y-подібним переходом базувався на використанні круглого феритового циліндра. Однак використання феритового циліндра призводить до відносно високих значень КСХ на трьох портах циркулятора через відбиття від поверхні циліндра, коли хвилі потрапляють на з'єднання. У багатьох практичних пристроях феритовий циліндр замінюється на феритовий циліндр прямокутної форми, як показано на рисунку 1.6. При такому розташуванні ферит представляє собою конічний розрив у хвилеводі, що зменшує відбиття і, отже, зменшує втрати у трьох портах.

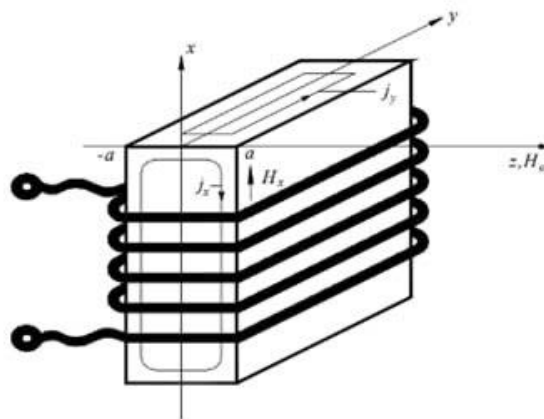


Рисунок 1.6 Феритовий циліндр прямокутної форми.

Більш широке обговорення використання феритів прямокутної форми наведено в роботі Лінкхарта, який також надає практичну інформацію щодо розмірів феритів [11]. Використання трикутної форми має додаткову

перевагу - запобігання зв'язку з режимами вищих порядків у широкосмуговому діапазоні.

Ферит прямокутної форми поводитья подібно до циліндричного фериту, в тому сенсі, що режими зустрічного обертання призводять до резонансної картини стоячих хвиль.

Фізичні основи роботи напівпровідникового ізолятора заснована на ефекті розмірного резонансу геліконових хвиль в пластині, розміщеній в статичному магнітному полі.

Поширення магніто-плазмової хвилі  $\pm k$  можна визначити з характеристичного рівняння :

$$c^2 k_{\pm}^2 = \frac{\omega_p^2 \omega}{\pm \omega_H + i\tau^{-1}} \quad (1.3)$$

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi N e^2}{m} \quad (1.4)$$

$$\omega_H = \frac{eH}{mc} \quad (1.5)$$

де  $k$  - хвильовий вектор,  $\omega$  - частота,  $\omega_H$  - циклотронна частота,  $\omega_p$  - частота плазми,  $H$  - магнітне поле,  $\tau$  час релаксації і  $m$  - ефективні носії маси.

Елементи з аргументом  $k_+$  спричинені геліконовими хвилями.

Якщо ж значення циклотронної частоти перевищують одиницю, маємо :

$$k_+ = \sqrt{\frac{\omega_p^2 \omega}{\omega_H c^2}} \left( 1 - \frac{i}{\omega_H \tau} \right) \quad (1.6)$$

В свою чергу ефективна магнітна проникність буде визначатись наступним виразом:

$$\mu_{eff} = \frac{\Phi_x}{2aH} = \frac{tga_-}{2k_-a} + \frac{tga_+}{2k_+a} \quad (1.7)$$

## 1.2. Різновиди циркуляторів НВЧ

Смушкові циркулятори НВЧ поділяються на кілька основних типів, залежно від конструктивних особливостей і принципу дії. Ці типи забезпечують різні характеристики і можливості, які використовуються в різних додатках. Ось основні види смушкових циркуляторів НВЧ:

- Феритові смушкові циркулятори [11].

Цей тип циркуляторів використовує феритове осердя, яке намагнічується зовнішнім магнітним полем. Ферит створює необхідну асиметрію в розподілі магнітного поля, що забезпечує циркуляцію сигналу між портами. Феритові смушкові циркулятори є найпоширенішими завдяки їхній стабільності та високим показникам ізоляції й передачі. Їх активно використовують у радіотехніці, супутниковому зв'язку та радарних системах.

- Смушкові циркулятори з магнітостатичними хвилями.

Ці циркулятори використовують принцип магнітостатичних хвиль у феритовому осерді для управління потоком сигналів. Такий підхід дозволяє досягати більш високої ізоляції між портами, що робить ці циркулятори підходящими для високочастотних систем з низькими втратами. Вони застосовуються в складних телекомунікаційних системах і приладобудуванні.

- Смушкові циркулятори на основі плазмонних хвиль.

Цей вид циркуляторів використовує явища плазмонних хвиль для передачі сигналу між портами. Плазмонні циркулятори мають компактну конструкцію і забезпечують високу ефективність у широкому частотному діапазоні. Вони можуть працювати при

надвисоких частотах, що робить їх перспективними для нових технологій, таких як 5G та квантові комунікаційні системи.

- Мікροстрічкові циркулятори.

Мікροстрічкові циркулятори використовують мікροстрічкові лінії передачі, що дозволяє зменшити розміри пристрою і зберегти його ефективність. Вони є ідеальними для компактних пристроїв, які працюють у високочастотних діапазонах, таких як бездротові комунікаційні системи. Хоча вони можуть мати дещо нижчу ізоляцію порівняно з феритовими циркуляторами, їх перевага полягає в мініатюризації.

Кожен з цих типів смужкових циркуляторів має свої переваги і обмеження, що визначає їх застосування в конкретних областях. Їх вибір залежить від необхідних параметрів, таких як частотний діапазон, ізоляція, втрати на відбиття та інші характеристики, важливі для роботи конкретної системи [11].

Активний циркулятор і активний квазіциркулятор, які сумісні з сучасними MMIC і RFIC технологіями, мають застосування як частини мікрохвильової печі трансиверів. Циркулятор можна використовувати як ізолятор для чутливих пристроїв, таких як осциляторів, якщо один з портів закінчується узгодженим навантаженням .

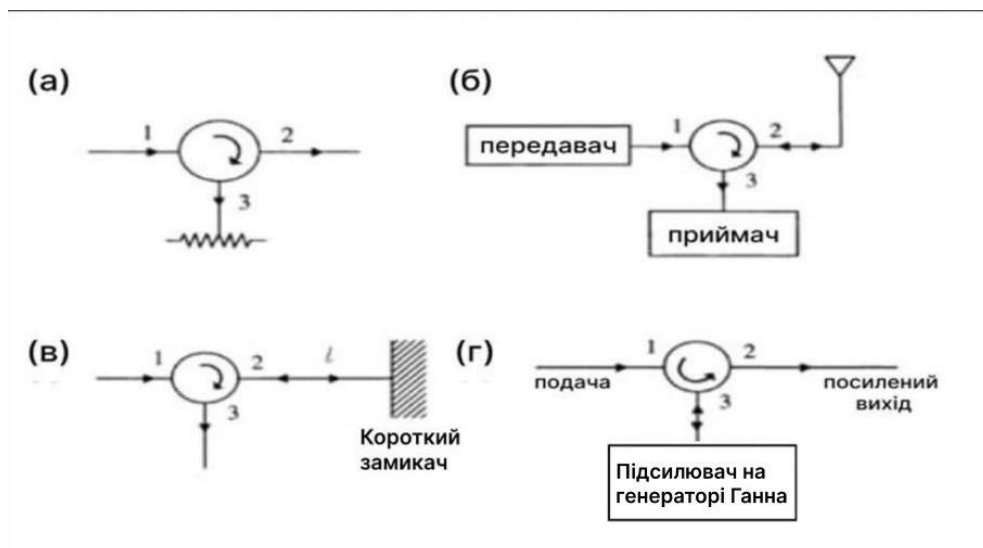


Рисунок 1.7 Варіації видів циркуляторів.

Як показано на рисунку 1.7, циркулятор можна використовувати як (а) ізолятор; (б) дуплексор; (в) фазообертач; (г) підсилювач на генераторі Гана.

Якщо електромагніт для зміщення феритового циркулятора, то він може працювати в однополюсному двотактному перемикачі. Циркулятор також можна використовувати як ізолятор, замикаючи один з портів з узгодженим навантаженням.

## РОЗДІЛ 2. КЛАСИЧНА ТЕОРІЯ ТРЬОХПОРТОВОГО ЦИРКУЛЯТОРА

Аналіз теорії циркулятора починається з опису матриці пов'язаної з трипортовою компонентою (2.1).

$$\begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Нульова діагональна матриця є прямим наслідком гіпотези співпадіння, тобто коефіцієнт відбиття дорівнює нулю для всіх трьох портів. Дійсно, метою є перевірка рішення для трьох портів, які одночасно підключаються, без втрат і невзаємності. Якщо  $i$  та  $j$  є індексами рядка та стовпця розсіювання матриці, умова без втрат може бути записана як у (2.2) для кожного стовпця, якщо  $i = j$ .

$$\sum_{k=1}^N S_{ki}^* S_{ki} = 1 \quad (2.2)$$

Також, вираз може бути інтерпретований в разі якщо  $i \neq j$ :

$$\sum_{k=1}^N S_{ki}^* S_{kj} = 0 \quad (2.3)$$

З наведених вище виразів можна перевірити унітарну умову а отже, і те, що компонент не має втрат, перевіривши, що точковий добуток будь-якого стовпчика  $[S]$  не спряжений з тим же стовпчиком дає одиницю, а добуток довільного стовпчика на спряжений з іншого стовпчика дає нуль, тобто стовпчики ортонормальні. Іншими словами, компоненти є без втрат незалежно від того, чи є матриця тотожності результатом добутку між матрицею та її спряженим транспонуванням.

$$|S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1 \quad (2.4)$$

$$|S_{21}|^2 + |S_{23}|^2 = 1 \quad (2.5)$$

$$|S_{31}|^2 + |S_{32}|^2 = 1 \quad (2.6)$$

$$S_{31} * S_{32} = 0 \quad (2.7)$$

$$S_{21} * S_{23} = 0 \quad (2.8)$$

$$S_{12} * S_{13} = 0 \quad (2.9)$$

Рівняння наведені вище є загальновідомими розв'язками, однак формули 2.4-2.6 не є коректними. Дійсно, вони отримані для симетричної матриці шляхом застосування умови унітарності до рядків, а не до стовпців. Зрозуміло, що це не стосується циркулятора, який в ідеалі є невзаємним, тобто матриця є асиметричною за визначенням.

Однак ці результати не можна вважати ані задовільними, ані коректними, оскільки вони не виключають наявності інших рішень. Дійсно, варто зазначити, що додаткові розв'язки повністю ігноруються в основних довідниках, хоча вони існують [12].

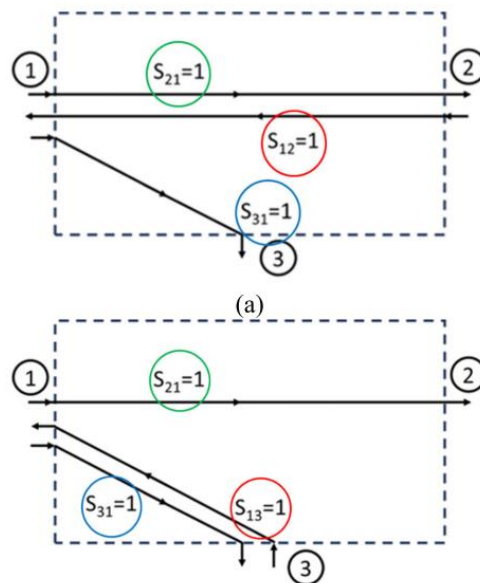


Рисунок 2.1 Кола, що відповідають невірним матрицям .

Ці рішення призводять до матриць (2.10) та (2.11), які, в свою чергу, відповідають колам, показаним на рисунку.

Дійсно, двонаправлена складова для одних і тих же портів не має сенсу в мікрохвильовій області через вищезгадані причини, отже, не представляє циркулятор [13].

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

## 2.1. Різновиди трикутних конфігурацій циркуляторів

Для трикутних конфігурацій з не намагніченим феритом  $\mu=1$ , число відсікання для домінуючої моди при відсутності магнітних гребенів має вигляд:

$$k_A = \frac{4\pi}{3} \quad (2.12)$$

Аналіз смужкового Y-циркулятора виконується за такими основними етапами: перший крок, шляхом точного функціонального аналізу ідеалізованої електродинамічної задачі, визначається загальна зосереджена еквівалентна схема. На другому етапі ця невзаємна схема нескінченних розмірів апроксимується в довільній частотній області. Наближена схема буде тим складнішою, чим ширша область частот і чим ближче вихідна схема повинна бути апроксимована [14]. У наведених вище рівняннях  $A$  - довжина сторони плоского трикутного резонатора в метрах, а  $k$  – радіальна постійна поширення.

На рисунку 2.2, представлені різні конфігурації трикутних планарних металічних елементів



Рисунок 2.2 Різновиди трикутних конфігурацій циркуляторів.

Точний розрахунок хвилеводних Y-циркуляторів вимагає розв'язку рівнянь Максвелла з неоднорідними граничними умовами. Розрахунок викликає значні труднощі через складне геометричне компонування.

Знаючи дане геометричне розташування та характеристики матеріалів, можна визначати параметри еквівалентної схеми та порівнювати їх з результатами вимірювання. Різниця між вимірними та розрахованими значеннями буде меншою за 10% .

## 2.2. Класична теорія циркуляторів

Втрати ізолятора були досліджені шляхом зміни тангенсу кута діелектричних втрат  $\tan\delta$  і феромагнітного резонансу довжини лінії (dH). Зі збільшенням діелектричних і магнітних втрат, втрати лінійно зростають.

Зі збільшенням розміру магніту зростають втрати на вході через збільшення площі. Таким чином, ізолятор з низькими втратами і невеликими розмірами можна вбудувати, зменшивши розмір магніту і втрат в феритовому матеріалі [14].

Зауважимо, що перехід від параметрів розсіювання до параметрів пропускання спрощує аналіз. Як тільки трьохпортові параметри розсіювання перетворені у відповідні їм параметри пропускання, ці параметри можна застосувати для аналізу, використовуючи трьохпортову матрицю пропускання параметрів, що представляє ідеальний циркулятор.

Слід підкреслити, що в цьому формулюванні припускається, що портові струми  $-I$ , вливаються у відповідний порт циркулятора, а напруги  $-V$  відносяться до спільного заземлення. Таким чином, струми та напруги портів пов'язані між собою наступним співвідношенням :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = Y_0 \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Тут  $Y_0 = 1/Z_0$  є характеристикою опису пропускання циркулятора.

Феромагнітні матеріали, такі як залізо, складаються з мікроскопічних областей, які називаються магнітними доменами, що діють як крихітні постійні магніти, які можуть змінювати напрямок намагніченості.

Коли до матеріалу прикладається зовнішнє намагнічуюче поле  $\vec{H}$ , воно проникає в матеріал і вирівнює домен, викликаючи крихітні магнітні поля, які повертають і вирівнюють паралельні лінії, магнітні поля повертаються і вирівнюються паралельно до зовнішнього поля. Це призводить до того, що вектор магнітного поля  $\vec{B}$  поширюється за межі матеріалу - це і є намагніченість [15].

### **РОЗДІЛ 3. МЕТОД ФУНКЦІЇ ГРІНА ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ЦИРКУЛЯТОРІВ НВЧ**

Опис низки експериментів та параметрів для циркуляторів НВЧ, може бути виконаний, за допомогою функції Гріна. Метод функції Гріна є потужним математичним інструментом, який часто використовується в електродинаміці для аналізу та розрахунку різних пристроїв.

Метод функції Гріна застосовується для розрахунку розподілу електромагнітного поля та характеристик пристрою через врахування складних граничних умов, неоднорідних середовищ і різних форм факторів циркулятора.

Основні кроки застосування методу функції Гріна:

Визначення рівнянь Максвелла та граничних умов: рівняння Максвелла, які описують поведінку електромагнітного поля, записуються з урахуванням граничних умов, що відповідають структурі циркулятора та його матеріальним властивостям.

Введення функції Гріна: функція Гріна використовується як фундаментальний розв'язок для рівняння Максвелла в обраній конфігурації. Вона описує поведінку поля в одній точці простору.

Застосування теорії потенціалу: з використанням функції Гріна можна перетворити рівняння Максвелла на інтегральне рівняння, де електромагнітне поле виражається як інтеграл по поверхні чи об'єму. Це дозволяє врахувати особливості конструкції циркулятора, включаючи вплив неоднорідностей і різноманітних матеріалів [16].

Розв'язання інтегральних рівнянь: для отримання конкретних значень параметрів циркулятора, наприклад коефіцієнта відбиття, коефіцієнта передачі, рівень ізоляції, інтегральні рівняння розв'язуються чисельними методами (наприклад, методом моментів). Результати дозволяють отримати характеристичні параметри циркулятора.

Аналіз результатів: На основі розрахованого розподілу електромагнітного поля і параметрів S-матриці можна оцінити робочі характеристики циркулятора. Функція Гріна дає можливість з високою точністю враховувати резонансні явища, які можуть виникати в структурі циркулятора.

### 3.1. Модель Гріна і Сендлі

На основі аналізу експериментальних результатів Грін і Сенді запропонували емпіричну модель для компонент тензора проникності  $\mu$ . Вони розробили метод прямого вимірювання проникності як функції намагніченості матеріалу. Ці вимірювання проводяться за допомогою циліндричної резонатор з коливанням ТМ<sub>110</sub>, в яку вводяться феритові стрижні. Потім проникність розраховується як функція зміни резонансної частоти і добротності, Q резонатора [17].

Феритовий стрижень намагнічується за допомогою електромагніту. Полюси електромагніту контактують з кінцями феритового стрижня для замикання магнітного потоку, забезпечуючи таким чином рівномірність намагніченості. Паралельні компоненти проникності  $\mu'_z$  та  $\mu''_z$  можуть бути виміряні за допомогою сферичних зразків з прямокутною рефлекторною порожниною TE<sub>102</sub>.

$$\mu = \mu_{(H=0)} + (1 - \mu_{(H=0)}) \left( \frac{M}{M_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.1)$$

$$\mu_z = \mu_{(H=0)} + \left( 1 - \frac{M}{M_s} \right)^{\frac{5}{2}} \quad (3.2)$$

$$\mu_{(H=0)} = \frac{2}{3} \left[ 1 - \left( \frac{\gamma 4\pi M_s}{\omega} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{3} \quad (3.3)$$

У цих виразах  $M_s$  - це намагніченість насичення зразка, а відношення  $\frac{M}{M_s}$  представляє приведену намагніченість зразка.

Вираз для діагональних членів, отриманий Гріном і Сенді для  $\mu(H=0)$ , подібний до виразу запропонованому Шломаном у розмагніченому випадку. Але в намагнічених станах ця модель не дуже точна. Крім того, вона не дає доступу до магнітних втрат матеріалу.

Функція Гріна  $G(\vec{r}, \vec{r}')$  описує відгук поля в точці  $\vec{r}$  на точкове джерело, розташоване в точці  $\vec{r}'$ . Для циркулятора розв'язок рівняння для електромагнітного поля  $\vec{E}(\vec{r})$  із застосуванням функції Гріна може представлятися як інтеграл:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \int G(\vec{r}; \vec{r}') \vec{J}(\vec{r}') dV' \quad (3.4)$$

де:  $V$  — об'єм фериту,

$\vec{J}(\vec{r}')$  — щільність струму в точці  $\vec{r}'$

Використовуючи розраховане поле, можна отримати параметри циркулятора, такі як коефіцієнти передачі  $S_{ij}$  (S-параметри), що показують, як сигнал переходить між портами циркулятора:

$$S_{ij} = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_L} \int \vec{E}_i * \vec{E}_j dS \quad (3.5)$$

де:

$Z_0$  — хвильовий опір порту,

$Z_L$  — навантаження на відповідний порт,

$\vec{E}_i$  — електричне поле на  $i$ -му порті,

$S$  — площа поперечного перерізу.

На основі функції Гріна можна записати інтегральне рівняння для поля в об'ємі фериту. Це рівняння дозволяє врахувати всі неоднорідності матеріалу і форму пристрою:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \int (\nabla \times G(\vec{r}, \vec{r}')) \mu^{-1} (\nabla \times \vec{E}(\vec{r}')) dV' \quad (3.6)$$

$V$  – об'єм феритового матеріалу,

$G(\vec{r}, \vec{r}')$  - функція Гріна для відповідної конфігурації.

Це рівняння вирішується чисельними методами, такими як метод моментів, щоб отримати точний розподіл електромагнітного поля.

### 3.2. Вплив геометрії фериту на розмагнічування та сумарне внутрішнє поле $H_0$

Для кінцевого розміру фериту повинні бути виконані граничні умови на краях диска, що призводить до розмагнічування поля яке змінюється в об'ємі фериту і змінює вектор намагніченості. Його можна описати у вигляді тензора, компоненти якого називаються факторами розмагнічування.

Залежність між факторами розмагнічування і вектором намагніченості зв'язок між полем розмагнічування і факторами задається наступним співвідношенням:

$$\overrightarrow{H_i^{(dem)}} = 4\pi \sum_j N_{ij} \overrightarrow{M_j} \quad (3.8)$$

де  $i$  - компонент розмагнічувального поля,  $M_j$  відноситься до  $(\rho, \varphi, z)$  або  $(x, y, z)$  компонент вектора намагніченості, а  $N_{ij}$ - коефіцієнти розмагнічування.

Повне внутрішнє поле  $H_0$  залежить від застосованих коефіцієнтів розмагнічування. Для феритового диска ми припускаємо, що  $z$ -орієнтовану

намагніченість величиною  $M_z = M_s$ . Для тонкого диску вираз для внутрішнього поля має вигляд:

$$H_0 = MBF - H_i^{(dem)} \quad (3.9)$$

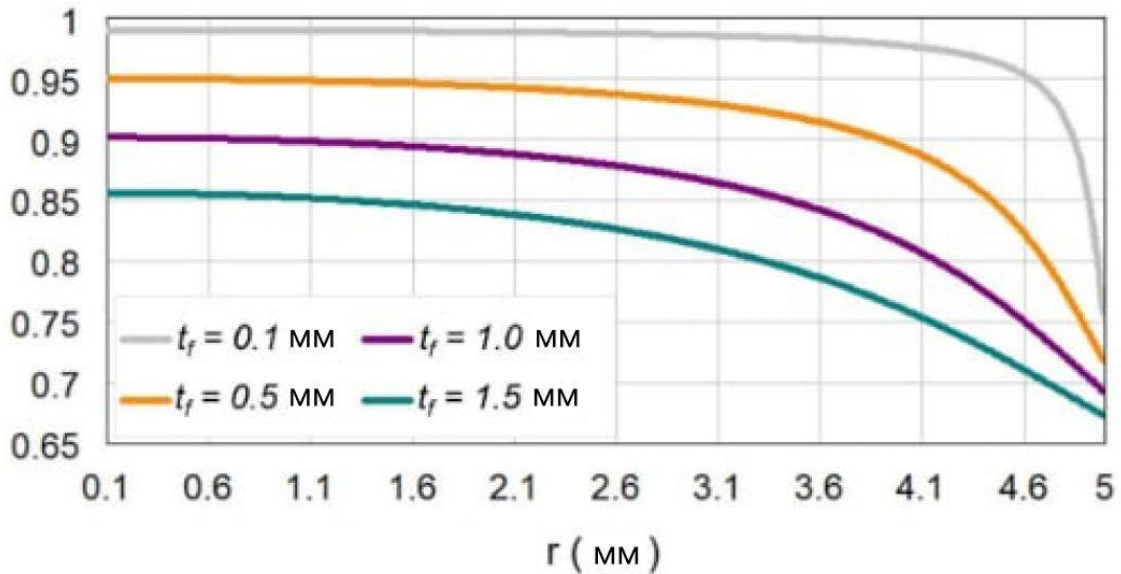


Рисунок 3.1 Розмагнічування для циліндричного фериту

На рисунку 3.1 наведено графік розмагнічування для циліндричного фериту радіусом 5 мм як функцію радіус і для різних товщини  $t_f$  з використанням рівнянь, наведених вище. З них видно, що тонші порожнини мають більш рівномірний коефіцієнт розмагнічування по перерізу, тим з більшою величиною та більшим коефіцієнтом розмагнічування.

Частота в розмагнічених полях зміщується і обчислюється за формулою:

$$f_r = \gamma \sqrt{[H_z + (N_y - N_z)M_z] \times [H_z + (N_x - N_z)M_z]} = \gamma [H_0 - H_{zz}M_s] \quad (3.10)$$

для  $N_y = N_x = 0$ ,  $N_z = N_{zz}$ ,  $N_z = H_0$  і  $M_z = M_s$ .

Вплив варіації товщини враховується за допомогою моделювання власної форми. Цей тип аналізу САПР, за своєю природою, не включає збудження. Для корисного аналізу власних форм ми спочатку обчислюємо нормований тензор  $\frac{\mu}{\mu_0}$  на центральній частоті, а потім присвоїмо значення полю  $\mu_{eff}$  у властивостях матеріалу.

Зі збільшенням товщини відбувається зсув частоти вгору, а також збільшення добротності без навантаження, і це можна пояснити тим фактом, що фактори розмагнічування і фазова швидкість всередині диска змінюються зі зміною геометрії.

Ідеальні електричні границі наносяться на верхню та нижню грані диска. Розмір має бути компромісом між швидкістю збіжності та мінімальною частотою моделювання, щоб уникнути перекриття з резонансами повітряного бокса. Аналіз власних мод наприклад у HFSS може дати уявлення про поведінку лише диска.

### **3.3. Метод еквівалентних схем для розрахунку параметрів циркуляторів НВЧ**

Основою методу еквівалентних схем є представлення циркулятора, як набору елементарних компонентів, які моделюють його реактивні і резистивні властивості. Еквівалентні схеми дозволяють оцінити розподіл струмів і напруг у вузлах циркулятора і його параметри, такі як коефіцієнт відбиття, коефіцієнт передачі та фазові характеристики [18].

Основні етапи методу еквівалентних схем для НВЧ-циркуляторів:

1. Моделювання фізичної структури: циркулятор зазвичай будується на основі феритових матеріалів, які створюють необхідні магнітні властивості. У моделях враховується геометрія циркулятора, магнітні параметри феритів, а також зовнішні впливи (наприклад, магнітне поле).

2. Вибір еквівалентної схеми: залежно від конструкції, циркулятор може бути представлений як еквівалентне коло з індуктивностями, ємностями та опорами. Для трьохпортивних циркуляторів часто використовується Y-подібна схема, що відображає передачу потужності між портами.
3. Розрахунок параметрів S-матриці: основним способом опису характеристик циркулятора є його S-матриця, яка показує зв'язок між вхідними і вихідними хвилями в різних портах.
4. Аналіз втрат та внесених реактивностей: на практиці феритові матеріали вносять невеликі втрати, що моделюються еквівалентними опорами. Додатково враховуються паразитні індуктивності та ємності, що можуть змінювати фазу і амплітуду сигналу.
5. Оптимізація та налаштування: після розрахунку початкових параметрів проводиться налаштування елементів схеми для досягнення бажаних характеристик циркулятора, таких як мінімальні втрати і максимальна спрямованість.

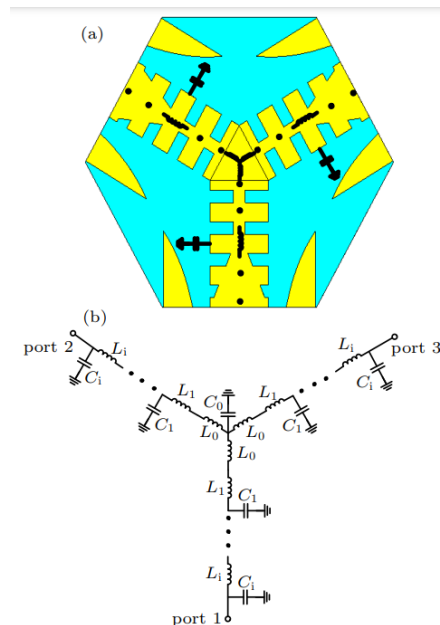


Рисунок 3.2 Еквівалентна схема трьохпортового циркуля тора.

Модель еквівалентної схеми широко використовується для аналізу робочого механізму фільтра та циркулятора. Зовсім недавно вона також використовувалась для аналізу передавальних характеристик фазового елемента системи. LC- коло, яке еквівалентне циркулятору показано на рисунку 3.2.

У цій моделі конденсатор  $C$  утворюється між центральним переходом провідника і заземлюючою пластиною, що дуже важливо для широкосмугового відгуку циркулятора. Індуктивність  $L$  на центральному переході є функцією  $\omega$ ,  $M_s$  і  $\vec{H}$ , що можна записати як  $L = L(\omega, M_s, \mu, k)$  [19].  $C_i$  утворюється між кожним коротким і металевим заземленням, з'єднаними індуктивністю  $L_i$ . При прикладанні однорідного статичного магнітного поля вздовж напрямку  $z$ , тензор діелектричної проникності має вигляд:

$$[\mu_m] = \begin{bmatrix} \mu & jk & 0 \\ -jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Тут  $\mu_{eff} = \mu \left[ 1 - \left( \frac{k}{\mu} \right)^2 \right]$  діагональний визначник  $\mu$  та поза діагональний член  $k$  є функціями частоти  $\omega$ , магнітного поля  $\vec{H}$  та намагніченості насичення  $M_s$ .

Матриця імпедансу невзаємного з'єднання  $Z$  може бути використана для знаходження трьох власних імпедансів. Відповідно до правил послідовного та паралельного з'єднання трьох портів, алгоритм власних значень може бути використаний для знаходження власних значень, що відповідають імпедансу.

Відповідно до теорії матриці імпедансу трьох портів невзаємного кола, власні значення матриці імпедансу визначаються як функція частоти і параметрів схеми.

Використовуючи взаємозв'язок між коефіцієнтами розсіювання трьох портів та імпедансами,  $S_{11}$  та  $S_{12}$  можуть бути визначені імпедансами,  $S_{11}$ ,  $S_{21}$  та  $S_{31}$  виражаються наступним чином:

$$S_{11} = \frac{1}{3}(z_0 + z_+ + z_-) \quad (3.12)$$

$$S_{21} = \frac{1}{3}(z_0 + z_+e^{-i2\pi/3} + z_-e^{i2\pi/3}) \quad (3.13)$$

$$S_{31} = \frac{1}{3}(z_0 + z_+e^{i2\pi/3} + z_-e^{-i2\pi/3}) \quad (3.14)$$

де  $z$  - власне значення односпрямованого збудження,  $z_+$  - власне значення позитивно-фазового збудження, а  $z_-$  - власне значення негативно-фазового збудження [20].

### 3.4. Метод часткових областей

Метод часткових областей – це чисельний підхід, який використовується для аналізу мікрохвильових компонентів, у тому числі мікросмужкових циркуляторів. Цей метод є особливо привабливим для моделювання цих пристроїв, оскільки він спрощує обчислювальну область, зосереджуючись на критичних областях, де поля є найбільш значущими.

Визначаються граничні умови для кожної області, на яку раніше був розбитий циркулятор. Важливим є застосування граничних умов, які враховують властивості матеріалу, анізотропію фериту. Далі є можливим розв'язання класичних рівнянь Максвелла для кожної області. Такий метод зосереджує обчислювальні потужності на областях зі складною поведінкою поля (наприклад, феритовий диск) і спрощує області з передбачуваними і очевидними полями.

Перевагами заданого методу є знижена обчислювальна складність, що зменшує час обробки результату. Метод є достатньо гнучким, адже підходить для анізотропних матеріалів, таких як ферити зі складною геометрією. Своє застосування він знайшов у високочастотних циркуляторах для 5G, радіолокаційних та супутникових системах зв'язку .

Структура циркулятора поділена на менші, більш керовані субдомени, кожна з яких представляє певну фізичну або геометричну область (наприклад, феритову, хвилевідну або діелектричну області). Це дозволяє проводити локалізовані обчислення, зберігаючи безперервність електромагнітних полів через границі.

Рівняння Максвелла застосовуються в кожній підобласті, враховуючи такі властивості матеріалу, як проникність ( $\mu$ ) та діелектричну проникність ( $\epsilon$ ). Граничні умови (безперервність  $E$  та  $H$  полів) застосовуються на інтерфейсах між доменами.

Кожен субдомен генерує набір польових рішень (наприклад, з використанням методів кінцевих елементів або кінцевих різниць).

Ці рішення пов'язані між собою за допомогою матриць зв'язку, щоб сформуванати глобальну систему рівнянь, що представляє весь циркулятор [21].

## РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ЦИРКУЛЯТОРА НВЧ В САПР

Для коректного моделювання була обрана програма ANSYS HFSS. В ній будуються моделі по заданим параметрам, додатково використовується програма ANSYS Maxwell.

Модель має відповідні розміри магніту що знаходиться під діелектричною підкладкою (рожевий колір) висота магніту 3.81мм зображений на рисунку 4.1.

Важливим компонентом трьох портового циркулятора є смужкові лінії, котрі представляють собою лінії, що проведені до усіх портів циркулятора і з'єднуються між собою у центрі диском. Смужки відображені відносно диску на  $120^\circ$  кожна і є симетричними відносно центру моделі.

Товщина смужкової лінії  $t_1 = 101$  мкм. Висота діелектричної підкладки, виконаної з фериту 0,508 мм.

Величина магнітної індукції для заданого пристрою становить 500 Гс.

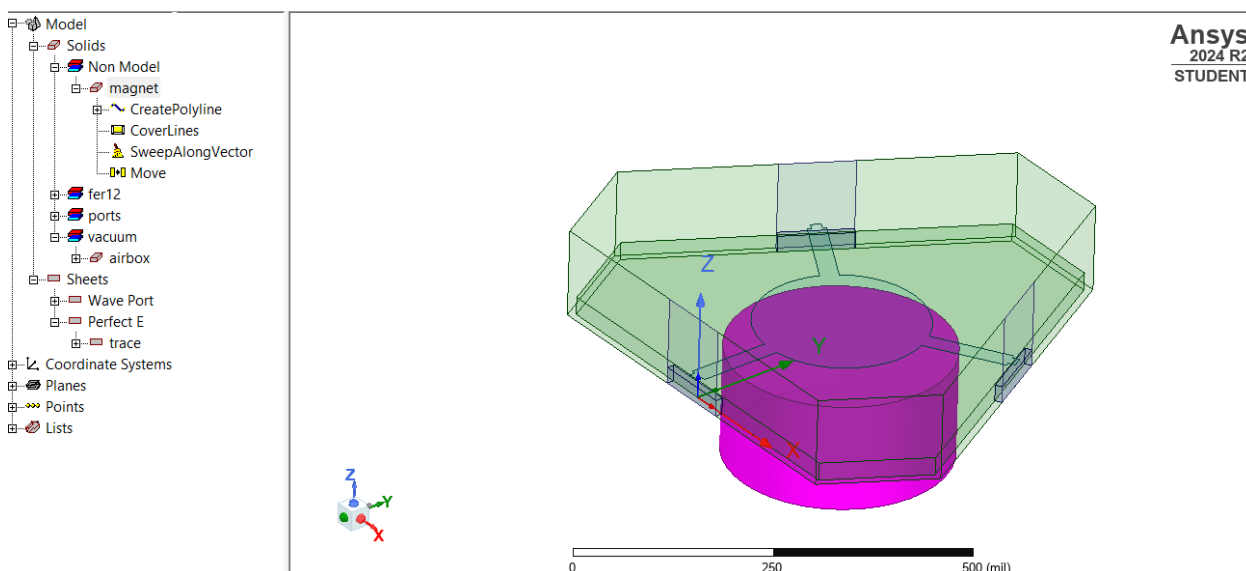


Рисунок 4.1 Структура смужкового циркулятора в HFSS.

Ферит в даній ситуації має нелінійні властивості, це яскраво видно на рисунку 4.2.

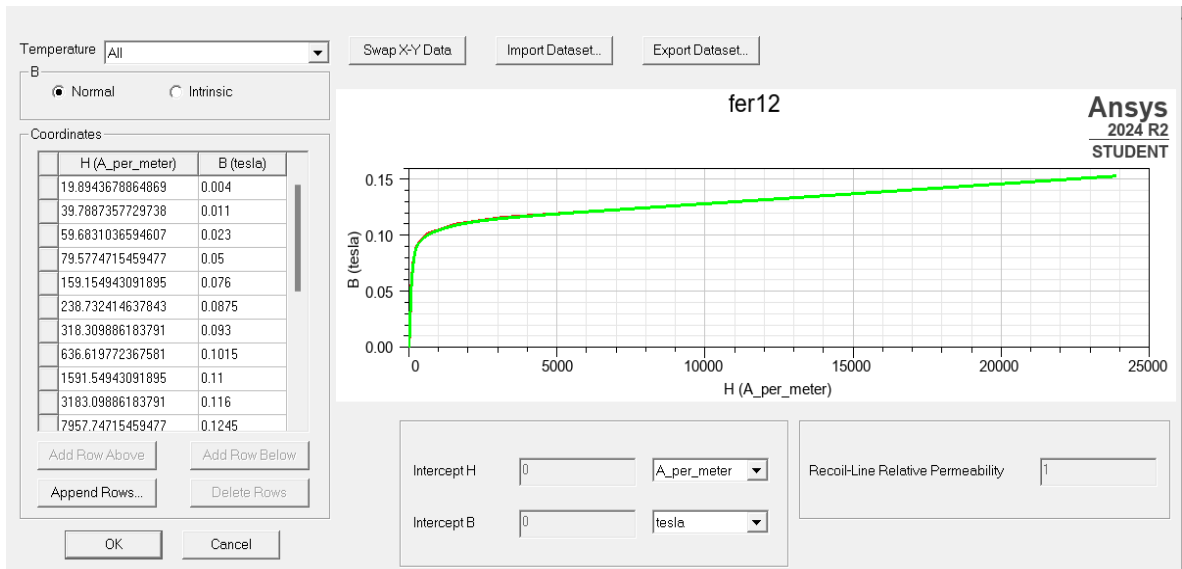


Рисунок 4.2 Графік нелінійності властивостей діелектричної підкладки.

Модель має 3 порти (Wave port 1-3), сигнал буде подаватись на порт 1, додатково є джерело магнітного поля, що прикладається до об'єкту.

Найцікавішим для визначення є магнітне поле, що показано на рисунку 4.3, не є ідеальним, адже магнітна проникність фериту, як згадувалось вище, не є лінійною, через що поляризація буде розповсюджуватись достатньо нерівномірно, тому поле не правильно розподіляється по фериту.

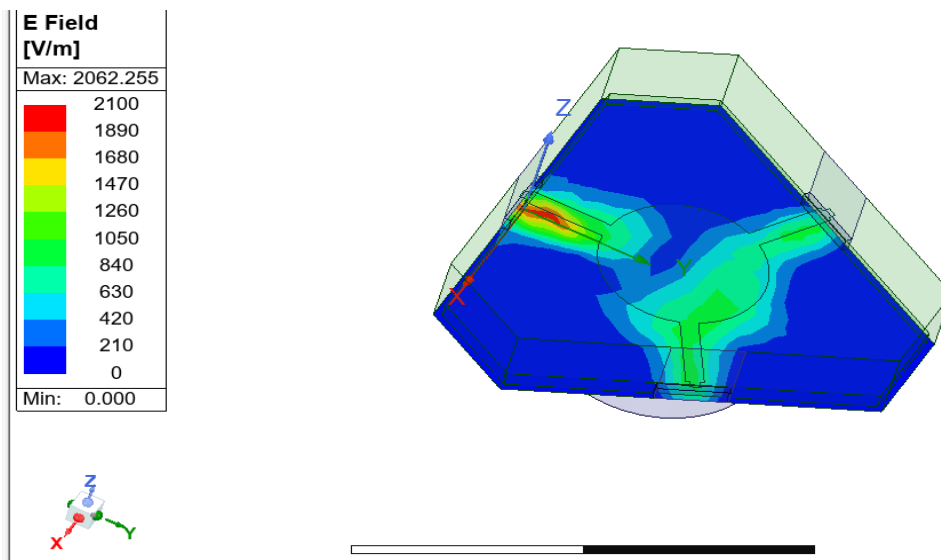


Рисунок 4.3 Розподіл електричного поля в фериті.

На рисунку 4.3 бачимо, що сигнал подається в 1 порт і йде в 3, але велике значення цього поля передається також в 2 порт, чого бути не повинно, адже це суперечить роботі циркулятора. Також, бачимо невірний розподіл по значенням енергії, що передається між портами, на вході та виході значення не є рівними.

Краще розібратись допоможуть графіки, зображені на рисунку 4.4 На них чітко видно, що параметр  $S_{11}$  має бути рівним до параметра  $S_{21}$  для другого порту. Бачимо що рівень сигналу в першому та другому плечі відрізняються, це може створювати поміхи. Сигнал на третє плече передається теж не лінійно, втрати складають близько -1 дБ, що є некоректним для роботи циркулятора.

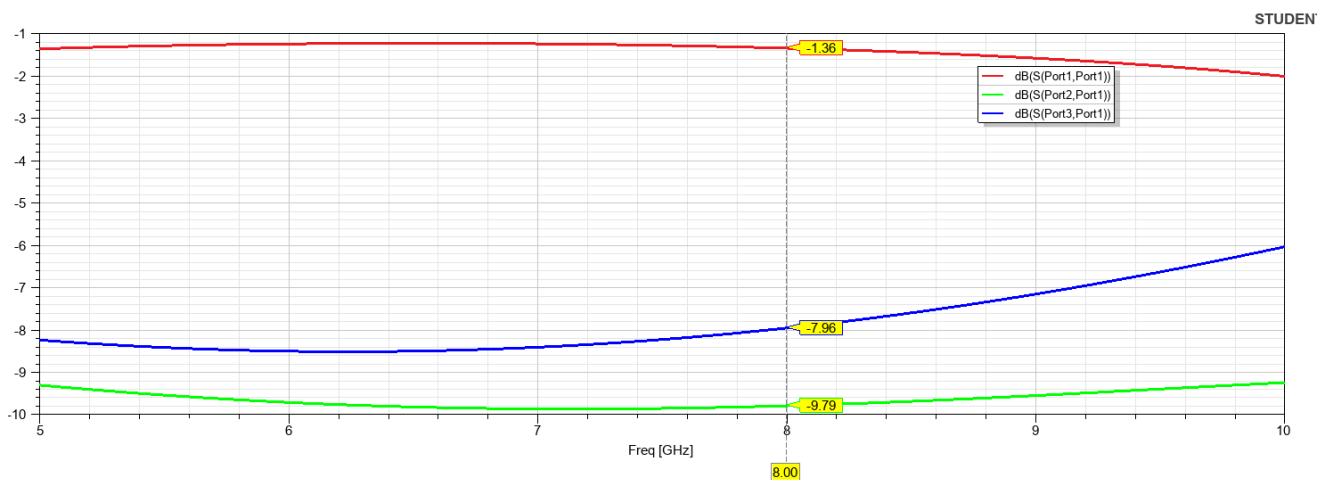


Рисунок 4.4 Залежність частоти на портах циркулятора.

Все це відбувається через те, що у ферита, як згадано раніше магнітна проникність є нелінійною, однорідне магнітне поле розподіляється в ньому нелінійно, що призводить до нерівномірної поляризації кристалічної структури фериту. виправити це можна, розмістивши ферит в неоднорідне магнітне поле, що утворене постійними магнітами.

Введемо до моделі постійний магніт, поглянемо на зміни. На рисунку 4.5 чітко видно різницю розподілу електричного поля, коли розподіл відбувається рівномірно і по напруженості поля ми бачимо, що на 1 порту та

на 3 порту майже однакові, в той час як у 2 порту вона відсутня. Тобто, енергія, що передається в 2 порт втрачається десь у фериті.

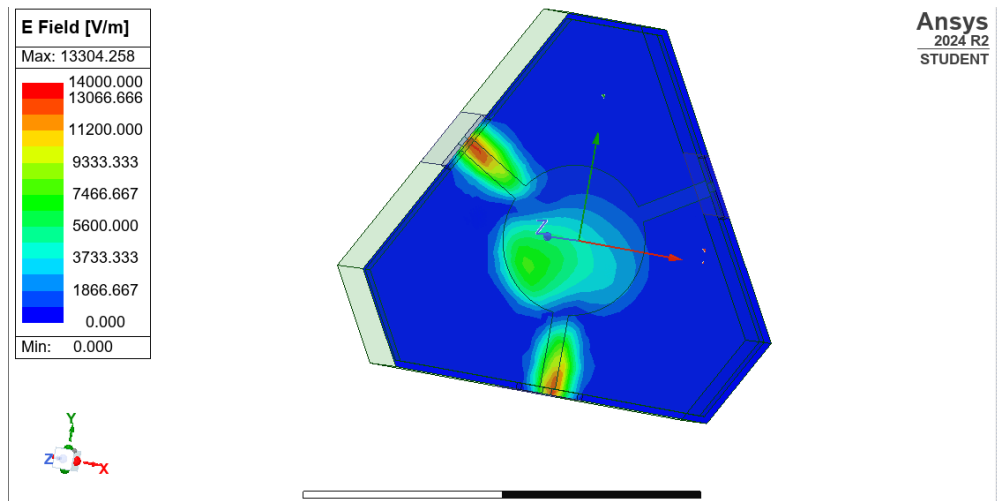


Рисунок 4.5 Розподіл електричного поля з постійним магнітом.

На рисунку 4.6 бачимо розподіл магнітних полів в циркуляторі, помітимо, що надважливим є перетікання поля саме між портами 1 та 3, куди і має за задумом проходити сигнал, в той час як на порті 2, магнітне поле не є яскраво вираженим.

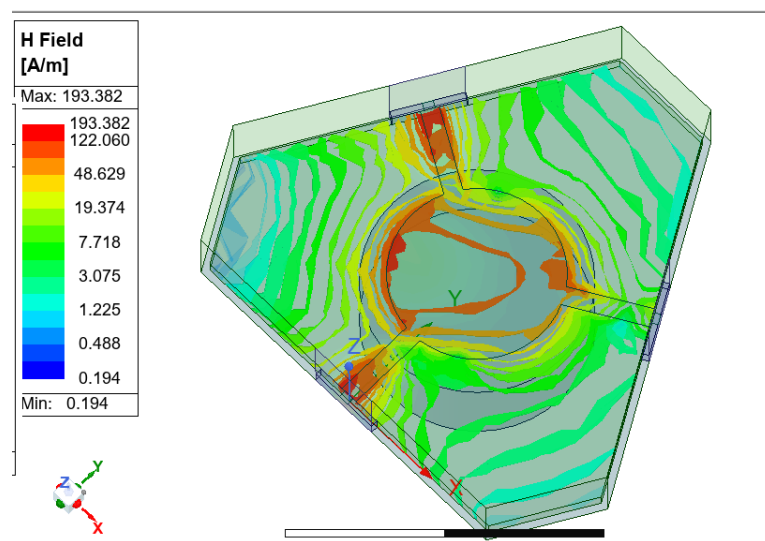


Рисунок 4.6 Розподіл магнітного поля в змодельованому об'єкті.

Одним із важливих параметрів при дослідженні такого типу циркуляторів є товщина смужкової лінії. Дослідимо вплив товщини смужкової лінії на параметри S-матриці. На рисунку 4.7 представлені залежності параметрів S-матриці. Тут товщина діелектричної підкладки має товщину  $d=0.508$  мм, товщина смужкової лінії становить  $t=101$  мкм. Бачимо, що мінімальне значення спостерігається поблизу частоти близько 10 ГГц.

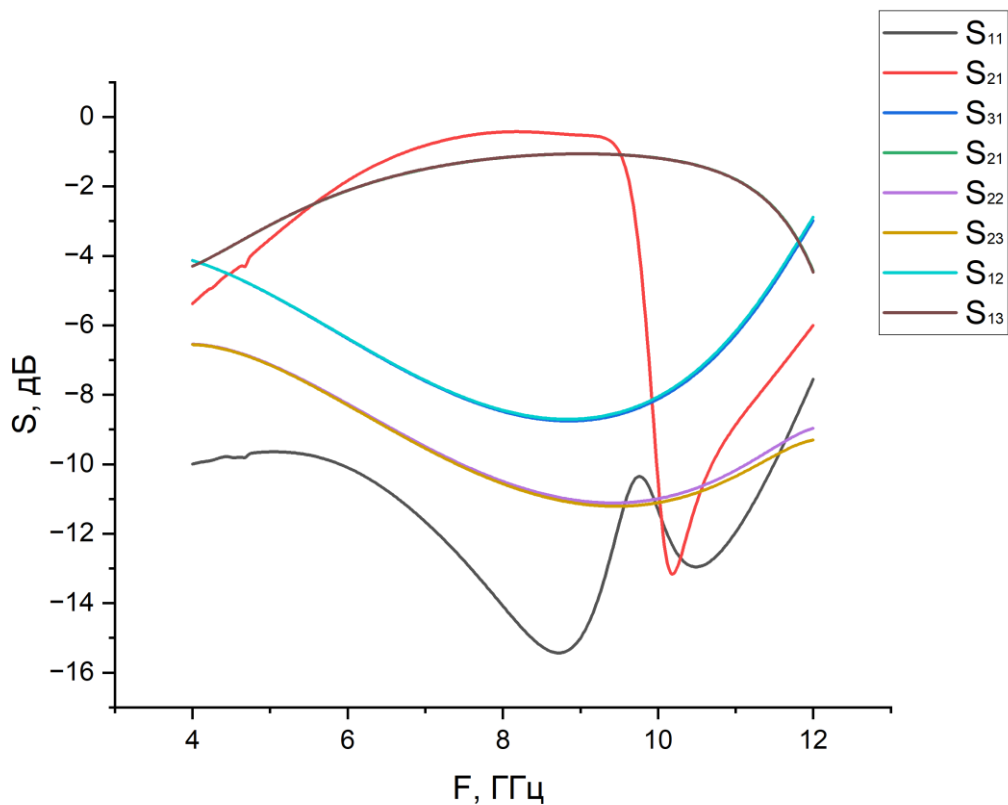


Рисунок 4.7 Залежності S-матриці циркулятора при зміні товщини смужкової лінії.

Наступним параметром який був зміненим є товщина діелектричної підкладки  $d=0,635$ , товщина смужкової лінії  $t=139$  мкм. На рисунку 4.8 приведені залежності ізоляції від частоти при зміні товщини підкладки і ширини смужки. З рисунка видно, що крива S<sub>31</sub> має значення близькі до нуля в діапазоні частот 5,5-8,5 ГГц. Значення зворотних втрат S<sub>11</sub> на частоті 7.8 ГГц становлять -25дБ, а внесені втрати S<sub>21</sub> у цьому випадку -27,5 дБ.

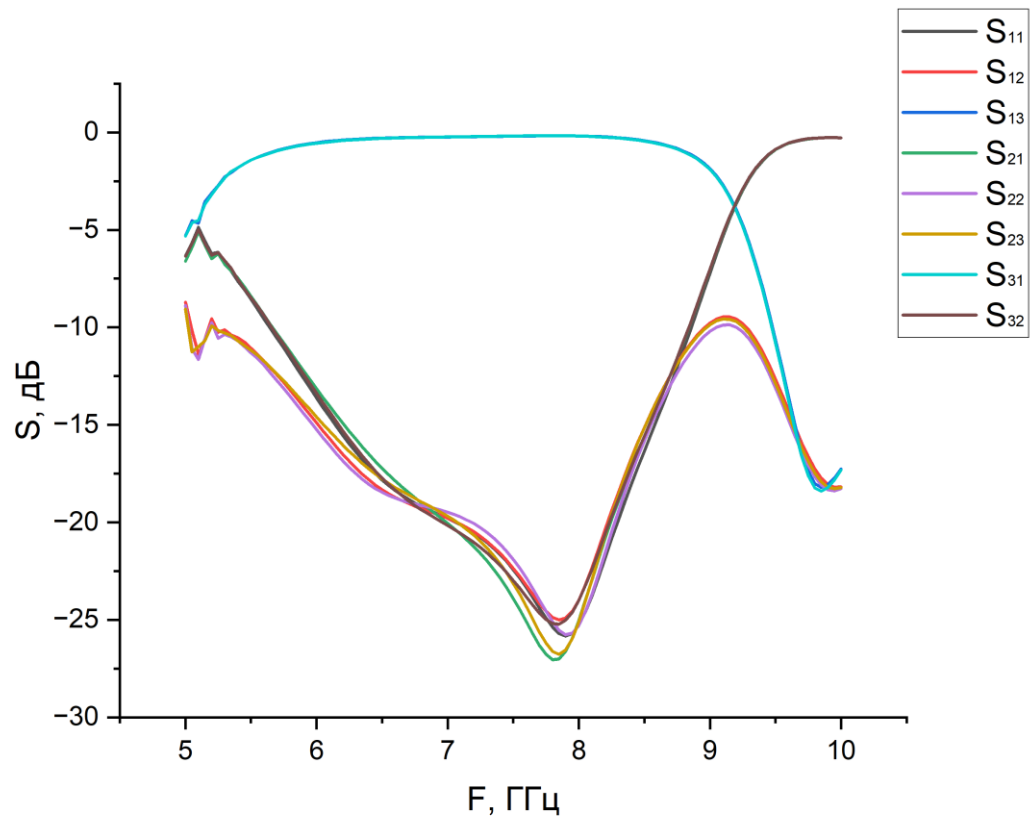


Рисунок 4.8 Залежності ізоляції від частоти при зміні товщини і ширини смужки.

Зміна товщини феритової підкладки суттєво впливає на характеристики циркулятора. На рисунку 4.10 представлені залежність зворотних та внесених втрат від частоти при зміні від товщини феритової підкладки  $d = 0.762$  мм, товщина смужкової лінії  $t = 139$  мкм. Як видно із графіків зворотні втрати  $S_{11}$  досягають рівня  $-28$ дБ, внесені втрати  $S_{21}$  практично рівні  $-1$ дБ в частотному діапазоні  $5,5-8,5$  ГГц, ізоляція  $S_{31}$  має значення  $-36,7$ дБ. При цих параметрах феритової підкладки і ширини смужок циркулятор працює коректно.

Зворотні втрати збільшуються при збільшенні товщини феритової підкладки. Для кожного набору параметрів реалізується процес оптимізації, але ми не можемо стверджувати, що отримані результати є найкращими для кожної структури, оскільки модель є багатопараметричною.

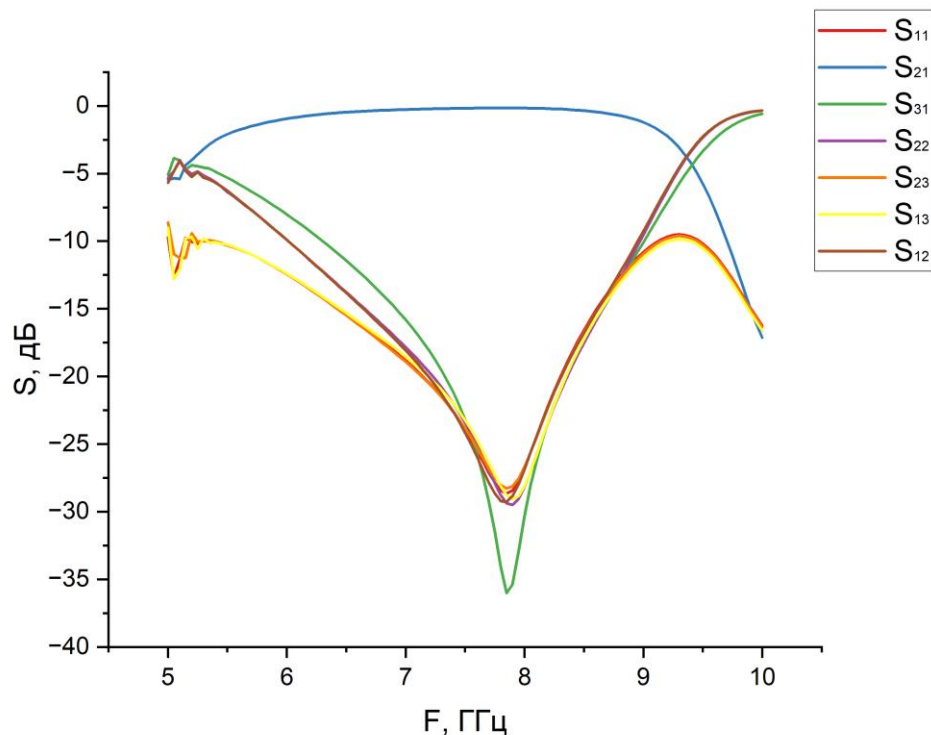


Рисунок 4.9 Залежність зворотних та внесених втрат від частоти при зміні товщини діелектричної підкладки.

Розширення робочого частотного діапазону до 10-20 ГГц, призводить до нелінійної роботи циркулятора. На рисунку 4.10 представлені залежності ізоляції від частоти. Як видно із графіків всі криві мають коливальний характер і їх значення не перевищує – 1дБ. Значення товщини феритової підкладки і товщини смужок ідентичні з наведеними значеннями вище.

На рисунку 4.11 представлені залежність зворотних та внесених втрат від частоти при зміні товщини діелектричної підкладки. Товщина діелектричної підкладки становить  $d = 0,508$  мм, товщина смужкової лінії становить  $t = 58$  мкм. При аналізі кривих видно, що внесені втрати не перевищують значення - 1 дБ, а зворотні втрати мають значення -36,5 дБ на частоті 7.8ГГц.

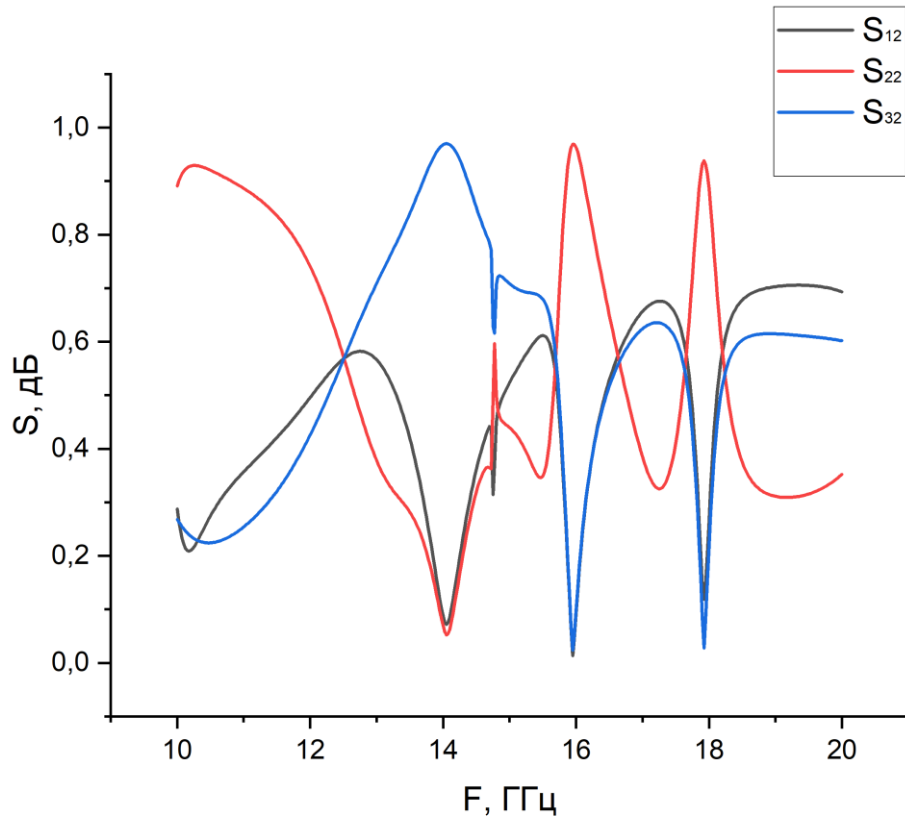


Рисунок 4.10 Залежності ізоляції від частоти.

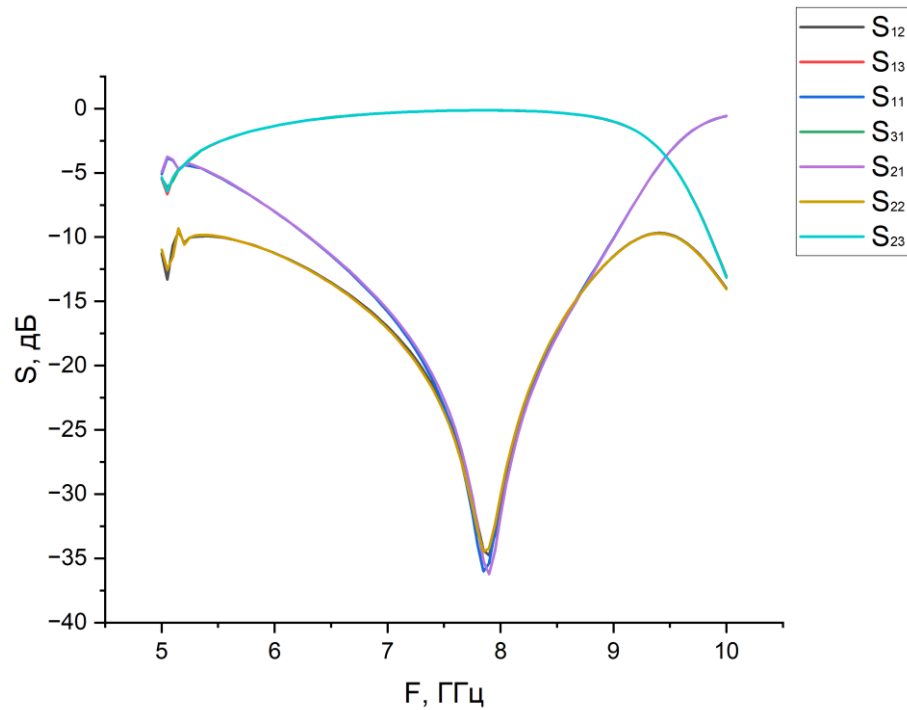


Рисунок 4.11 Залежність зворотних та внесених втрат від частоти при зміні товщини діелектричної підкладки.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено моделювання та оптимізацію циркулятора НВЧ в смужковому виконанні на феритовій підкладці з додатковим магнітом. Отримані результати підтверджують наступні висновки:

1. Представлений розподіл електричного та магнітних полів структури.
2. Отримані результати демонструють, що збільшення товщини смужкових ліній, а також збільшення товщини феритової підкладки призводить до перерозподілу електричних та магнітних полів, що змінює ефективність взаємодії з феритовою областю циркулятора.
3. Втрати через так званий скін ефект можуть бути зменшені, може бути поліпшена ізоляція.
4. Товщина феритової підкладки також впливає на резонанс феритового диску через зміну умов збудження хвиль.
5. Значення зворотних і внесених втрат можуть змінюватися в достатньо широких границях.

Результати даних досліджень можуть бути використані для оптимізації роботи циркуля торів, підлаштування їх під потрібні параметри та подальше налаштування або використання на практиці в телекомунікаційних системах, радарях або інших високочастотних системах, де є важливою компактність, надійність та ефективність.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Afzal N., Udata R. Designing and measurement of routing module for transceiver system at 3.125ghz : thesis. 2014.
2. Akaiwa Y. Operation modes of a waveguide Y circulator (short papers). IEEE transactions on microwave theory and techniques. 1974. Vol. 22, no. 11. P. 954–960.
3. A tunable microwave circulator based on a magnetized plasma as an active gyrotropic element / H. Mehrpour Bernety et al. Physics of plasmas. 2022. Vol. 29, no. 11. P. 112-114.
4. A wideband and highly efficient circulator load modulated power amplifier architecture / H. Zhou et al. IEEE transactions on circuits and systems I: regular papers. 2023. P. 1–13.
5. Broadband cyclic-symmetric magnetless circulators and theoretical bounds on their bandwidth. IEEE Xplore. 2022. P. 92-104.
6. Davies J. B., Cohen P. Theoretical design of symmetrical junction stripline circulators. IEEE transactions on microwave theory and techniques. 1963. Vol. 11, no. 6. P. 506–512.
7. Design of 3 GHz stripline ferrite circulator for radar applications / A. Setiawan et al. 2017 international conference on radar, antenna, microwave, electronics, and telecommunications (ICRAMET), Jakarta, 23–24 October 2017. 2017.
8. Design of a circulator with ferrite thin film / K. Oshiro et al. Journal of the magnetics society of japan. 2005. Vol. 29, no. 4. P. 490–493.
9. Ding-Jie Huang, Jing-Lin Kuo, Huei Wang. A 24-GHz low power and high isolation active quasi-circulator. 2012 IEEE/MTT-S international microwave symposium - MTT 2012, Montreal, QC, Canada, 17–22 June 2012. 2012.

10. Fabrication of a resonance absorption-type microstrip line isolator using polycrystalline YIG / M Kim et al. Journal of the magnetics society of japan. 1998. Vol. 22, S\_1\_ISFA\_97. P.363–365.
11. Hagelin S. Analysis of lossy symmetrical three-port networks with circulator properties. IEEE transactions on microwave theory and techniques. 1969. Vol. 17, no. 6. P. 328–333.
12. Martin D. H., Wylde R. J., Wylde R. J. Wideband circulators for use at frequencies above 100 ghz to beyond 350 ghz. IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2009. Vol. 57, no. 1. P. 99–108.
13. Cardillo E., Ferro L., Carcione F. L. An Insight on the Microwave Circulator Theory. IEEE Access. 2024. P. 1.
14. Marzall L., Psychogiou D., Popovic Z. Microstrip ferrite circulator design with control of magnetization distribution. IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2021. Vol. 69, no. 2. P. 1217–1226.
15. Microwave circulator design. Norwood, MA : Artech House, 1989. P.168.
16. Multipactor characterization of ferrite materials for space applications / V. Cardona et al. 2018 IEEE MTT-S international conference on numerical electromagnetic and multiphysics modeling and optimization (NEMO), Reykjavik, 8–10 August 2018. P. 56-88.
17. Quan W., Koomson V. J., Afsar M. N. Hexagonal nano-ferrites used on a v-band self-bias on-chip circulator for CMOS. 2022 Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG), New Orleans, LA, USA, 10–14 January 2022. P.45-68.
18. Widely tunable on-chip microwave circulator for superconducting quantum circuits / B. J. Chapman et al. Physical review X. 2017. Vol. 7, no. 4.
19. Xu Y., Zhao J. Theoretical analysis and design of wide band h-plane waveguide y-junction circulator. Microwave and optical technology letters. 1989. Vol. 2, no. 7. P. 268–272.
20. Douglas Linkhart. Microwave Circulator Design. Second Edition , Artech. 2014. Pages: 370

21. Radionavigation Systems Borje Forsell Copyright: Artech Hous 2008  
Pages: 416