



Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма "Радіоелектронні апарати та засоби"

( повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри ПЕЕА

Хорошайло Ю.Є. \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

## ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачу Котлярову Дмитру Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження невзаємних властивостей резонансних феритових вентилів затверджена наказом по університету від 14 11 2022 р. № 1475 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 05 грудня 2022 р.
3. Вихідні дані до роботи Дослідити невзаємні властивості резонансних феритових вентилів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз літературних джерел

4.3 Розробка основних теоретичних закономірностей та співвідношень

4.4 Розробка методики експериментальних досліджень

4.5 Охорога праці

4.6 Висновки;

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) \_\_\_\_\_

Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз завдання	07.09.22	виконано
2	Пошук літератури	15.09.22	виконано
3	Аналіз літературних джерел	01.10.22	виконано
4	Моделі та методи	14.10.22	виконано
5	Моделювання друку виробів	01.11.22	виконано
6	Автоматизація проектуванн	15.11.22	виконано
7	Виконання розділу «Охорона праці»	05.12.22	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	08.12.22	виконано

Дата видачі завдання 01 09 2022 р.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Котляров Д.В.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

проф.Хорошайло Ю.Є.

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи магістра: 60 с., 1 табл., 19 рис., 13 джерел.

ФЕРИТОВИЙ ВЕНТИЛЬ, ВЕНТИЛЬНЕ СПІВВІДНОШЕННЯ, ВТРАТИ В ПРЯМОМУ НАПРЯМКУ, ВТРАТИ В ЗВОРОТНОМУ НАПРЯМКУ, ЧАСТОТНІ ВЛАСТИВОСТІ, ЕЛЕКТРОДИНАМІКА, ВЕРИФІКАЦІЯ, КРУГОВА ПОЛЯРИЗАЦІЯ, РОЗПОДІЛ ПОЛЯ В ХВИЛЕВОДІ

Актуальність роботи полягає в удосконаленні моделі резонансного феритового вентиля для прямокутного хвилеводу. Антено-фідерні пристрої, генераторна, приймальна, вимірювальна НВЧ апаратура містять в своєму складі феритові розв'язуючі прилади, тобто феритові вентиля і циркулятори. Об'єктом дослідження є процес поширення електромагнітних хвиль через феритовий вентиль у прямокутному хвилеводі.

Метою роботи є верифікація формули для втрат резонансного феритового вентиля в прямому і зворотному напрямку, а також вентильного відношення.

В результаті отримані аналітичні вирази втрат резонансного феритового вентиля у прямому та зворотному напрямках, а також вентильне співвідношення за допомогою послідовних математичних перетворень. Здійснено такі перетворення. Відношення поздовжньої константи розповсюдження до поперечної константи розповсюдження замінюються відношенням тригонометричних функцій синусів та косинусів. Перетворення базується на мікрохвильовій електродинаміці, а саме використовуються формули для розподілу полів у прямокутному хвилеводі для основного типу хвилі. Подальші перетворення полягають у виведенні спільного множника з дужок та інших арифметичних перетвореннях.

Пояснювальна записка виконана згідно ДСТУ 3008-2015[1].

## ABSTRACT

Explanatory note to the appraisal work of the master: 60 pp., 1 table., 19 Fig., 13 sources.

FERRITE ISOLATOR, ISOLATOR RATIO, DIRECT LOSS, REVERSE LOSS, FREQUENCY PROPERTIES, ELECTRODYNAMICS, VERIFICATION, CIRCULAR POLARIZATION, WAVEGUIDE FIELD DISTRIBUTION.

Context. The problem is to systematize and improve the models of a resonance ferrite isolator in the rectangular waveguide for the antenna-feeder devices, generating, receiving, measuring microwave equipment containing ferrite decoupling devices: ferrite isolators and circulators

Objective. The goal of the work is to verify the formula for the losses of the resonant ferrite isolator in the direct and reverse directions, as well as the isolator ratio.

There was obtained analytical expressions for the losses of the resonant ferrite isolator in the forward and reverse directions, as well as the isolator ratio by strict mathematical transformations. There was performed such transformations. The ratios of the longitudinal propagation constant to the transverse propagation constant are replaced by the ratios of the trigonometric functions sine and cosine, since they are continuous as opposed to tangents and cotangents. Such a transformation allows to avoid square roots in the formula for the losses of the ferrite isolator in the forward and reverse directions, which are associated with the presence of dispersion in the waveguide, as in the formula for wavelength in the waveguide. The conversion is based on microwave electrodynamics. The formulas are used for the distribution of fields in a rectangular waveguide for the main type of wave. Further transformations consist in taking the common factor out of brackets and other arithmetic transformations.

Explanatory note was made according to DSTU 3008-2015[1].

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень і термінів.....	7
Вступ.....	8
1. Аналітичний огляд літературних джерел. 1.Огляд за літературними джерелами стану питання дослідження, виявлення теоретичних передумов та можливих напрямків вирішення задач розробки .....	9
1.1 Фізичні явища, що лежать в основі феритових пристроїв НВЧ та пояснюють їх не взаємні властивості .....	9
1.2 Особливості конструкції пристроїв НВЧ.....	14
1.3 Приклад традиційного розрахунку конструкції резонансного феритового вентиля.....	18
2. Моделі та методи Розробка основних теоретичних закономірностей та співвідношень .....	24
2.1 Аналітичне виведення та гармонізація виразів для втрат в прямому та зворотному напрямку та вентильного співвідношення.....	24
2.2 Моделювання та автоматизоване проектування феритового вентиля в ANSYS HFSS та його результати.....	38
3.. Розробка методики експериментальних досліджень, вибір оснащення, необхідного для проведення експерименту, опис експериментальних установок	47
4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	50
4.1 Аналіз умов праці.....	50
4.2 Виробнича санітарія в НДЛ .....	51
4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях .....	56
Висновки .....	57
Перелік використаних джерел .....	58
Додаток А.....	60

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

$x, y, z$  – осі в прямокутній системі координат;

$E_y^0$  –  $y$ -проекція напруженості електричного поля;

$H_x^0$  –  $x$ - проекція напруженості магнітного поля;

$H_z^0$  –  $z$ - проекція напруженості магнітного поля;

$k_{0x}, k_c$  – постійна бічного поширення;

$\gamma_{y0}, \beta_0$  – постійна поздовжнього поширення;

$a$  – розмір широкої стінки хвилеводу;

$b$  – розмір вузької стінки хвилеводу;

$n$  – розміри феритової пластини з меншого боку;

$m$  – розміри феритової пластини з більшого боку,  $2m = t_1$ ;

$x_0$  – положення середини феритової пластини вздовж поперечного перерізу хвилеводу на середній частоті діапазону  $0_{x_0 = t_3 + \frac{t_1}{2}}$ ;

$x_1$  – положення середини феритової пластини вздовж поперечного перерізу хвилеводу на крайній частоті діапазону;

$\chi_{xx}''$ ,  $\mu_1''$  –  $xx$ -сприйнятливості, уявний термін;

$\chi_{xy}''$ ,  $k_1''$  – магнітна сприйнятливість, уявний термін;

$l_f$  – довжина феритової пластини

НВЧ – надвисокі частоти;

ФАР – фазовані антенні решітки

## ВСТУП

Антенно-фідерні пристрої, генераторна, приймальна, вимірювальна НВЧ апаратура містять феритові розв'язувальні пристрої, кількість яких іноді досягає сотні в одному комплекті. Без таких розв'язувальних пристроїв неможливе створення багатокаскадних підсилювальних схем, а також підсилювачів на активних двопортових елементах. Пристрої розв'язки значно спрощують створення фазованих антенних решіток (ФАР) і особливо активних ФАР.

Об'єктом дослідження є процес поширення електромагнітної хвилі через феритовий вентиль у прямокутному хвилеводі.

Феритові вентиля є невзаємними мікрохвильовими приладами з різними коефіцієнтами втрат у прямому та зворотному напрямку. Цей факт зумовлює їх використання для запобігання виходу з ладу генераторів через відбиту потужність від кінцевого навантаження. Феритові вентиля конструктивно є ділянкою хвилеводу з розміщеною в ньому феритовою пластиною; поза хвилеводом розташований постійний магніт. Феритові вентиля можна класифікувати на резонансні вентиля та вентиля зі зміщеним полем. Характеристики вентиля включають коефіцієнт ізоляції, прямі втрати та зворотні втрати.

Предметом дослідження є метод опису параметрів феритового вентиля.

В інженерних розрахунках для проектування феритових розв'язувальних пристроїв використовуються різні формули.

Метою роботи є порівняння формул, що описують один і той же параметр, і бажання показати їх зв'язок між собою. А в ширшому розумінні критичний аналіз, узагальнення та систематизація.

У дисциплінах, пов'язаних з проектуванням приладів НВЧ, при великій кількості посібників мало літератури про феритові прилади.

## 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ОГЛЯД ЗА ЛІТЕРАТУРНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ СТАНУ ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ, ВИЯВЛЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ТА МОЖЛИВИХ НАПРЯМКІВ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ РОЗРОБКИ

1.1 Фізичні явища, що лежать в основі феритових пристроїв НВЧ та пояснюють їх невзаємні властивості

Під узгодженням прийнято розуміти умови за яких поступає максимальна потужність від генератора до навантаження через передавальний тракт. Наявність відбитої хвилі в лінії призводить до втрат потужності на відбиття, зменшення максимально припустимої потужності переданої в навантаження, зменшення смуги частот, які передаються лінією передачі.

Для отримання узгодження довільного навантаження з лінією передачі поблизу від навантаження повинно бути включено узгоджувальний пристрій, призначення якого є забезпечення режиму біжучої хвилі в лінії до місця увімкнення цього пристрою.

Поглинаючий чотириполюсник не повинен вносити додаткових відбиттів. В якості такого чотириполюсника використовують феритові вентилі. Феритовий вентиль є прикладом невзаємного пристрою НВЧ. До невзаємних пристроїв належать такі, що мають різні властивості при проходженні крізь них електромагнітної хвилі в прямому і зворотному напрямках.

Феритовим вентилям у техніці НВЧ прийнято називати пристрій, загасання якого залежить від напрямку руху хвилі через нього. Основні властивості феритового вентиля є: згасання хвиль в прямому і зворотному напрямку, смуга робочих частот, припустимий рівень потужності,  $K_{ст}$ , тип і розміри хвилеводного тракту.

В основі конструкцій вентилів лежать ферити, що мають високі діелектричні властивості ( $\varepsilon \geq 10$ ,  $\text{tg}\delta \leq 10^{-3}$ ). У постійному магнітному полі ферит набуває анізотропні властивості, що дозволяє використовувати його для створення невзаємних пристроїв, тобто пристроїв, які мають невзаємні втрати, обертання площини поляризації, фазовий зсув.

Властивості феритів проявляються при взаємодії власного магнітного моменту електрона із зовнішнім полем. Під дією постійного магнітного поля  $H_0$  спіни електронів прагнуть орієнтуватися за напрямком прикладеного поля, прецесуючи навколо осі, що збігається за напрямком з вектором  $H_0$  й утворює з ним правою систему. Частота вільної прецесії  $\omega_0 = \gamma H_0$ , де  $\gamma = 2.2 \cdot 10^5$  – гіромагнітне співвідношення (рис. 1.1).

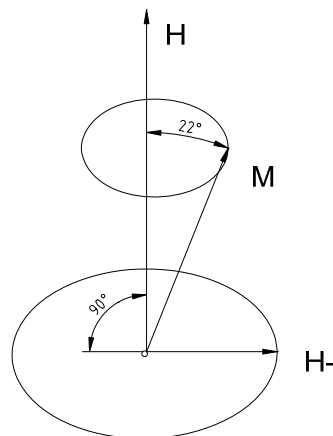


Рисунок 1.1 – Прецесія магнітного моменту електрона в постійному магнітному полі

Якщо змінне магнітне поле має лінійну поляризацію, то його можна надати як суму двох полів лівої й правої кругової поляризації. При відсутності у хвилеводі фериту, хвилі лівої й правої кругової поляризації поширюються з різними фазовими швидкостями й у сумі дають хвилю з незмінним положенням площини поляризації. Якщо ж у хвилеводі розташувати феритовий стрижень, намагнічений у поздовжньому напрямку постійним магнітним полем  $H_0$ , то при

( $H_0 \leq H_{рез}$ ) хвилі кругової поляризації правого напрямку обертання будуть поширюватися з більшою швидкістю, ніж лівого [2]

$$v_{\phi+} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu_+}}, v_{\phi-} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu_-}} \quad (1.1)$$

При цьому відбувається обертання площини поляризації хвилі. Ефект обертання площини поляризації електромагнітної хвилі, яка проходить через діелектрик (ферит) при наявності постійного магнітного поля, називається ефектом Фарадея.

У феритах у відносно сильному поздовжньому або поперечному магнітному полі спостерігається явище феромагнітного резонансу. При подовжньому підмагнічуванні резонанс має місце тоді, коли частота хвилі кругової поляризації правого обертання наближається до частоти прецесії електронів [3]

$$f_{\Pi} = f_0 = 2.84H_0$$

де  $f$  - частота в мегагерцах, а  $H_0$  в ерстедах.

Поперечне підмагнічування дає дещо більшу резонансну частоту.

$$f_{\perp} = f_0 \sqrt{1 + M_0/H_0}$$

де  $M_0$  - намагніченість фериту.

На рис.1.2 показаний характер залежностей магнітних проникностей фериту для правополяризованої хвилі  $\mu_+ = \mu'_+ + j\mu''_+$  та лівополяризованої  $\mu_-$  від величини  $H_0$ . З графіків видно, що магнітна проникність для правополяризованої хвилі має резонансний характер, і уявна складова магнітної проникності  $\mu_+$ , що

враховує втрати у фериті, максимальна при резонансі. Резонансний характер магнітної проникності  $\mu_+$  обумовлений тим, що частота і напрямок збуджуючого поля збігаються з частотою і напрямом прецесії електронів. Для лівополяризованої хвилі напрямок обертання поля та прецесії електронів протилежні, резонанс неможливий, і магнітна проникність  $\mu_-$  змінюється плавно.

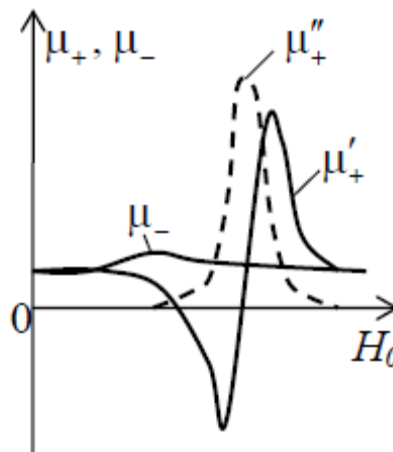


Рисунок 1.2 – Компоненти магнітних проникностей фериту в сильному магнітному полі

Частоту резонансу  $f_0$  шляхом зміни напруженості поля підмагнічування  $H_0$  можна підібрати рівною робочою частотою коливань. Правополяризовані хвилі при поширенні в напрямку  $H_0$  піддаються згасанню, а хвилі, що поширюються проти вектора  $H_0$ , практично не відчують згасання.

У тонких феритових пластинах прямокутному хвилеводі з хвилею типу  $H_{10}$  при поперечному підмагнічуванні спостерігається невзаємний фазовий зсув. Феритова пластина розташовується між серединою хвилеводу і однією з вузьких стінок, пластина підмагнічується слабким полем  $H_0$  перпендикулярно. У цьому структурі поля хвилі  $H_{10}$  майже порушується.

Невзаємний фазовий зсув зумовлений наступним. Компоненти магнітного поля основної хвилі в прямокутному хвилеводі  $H_{10}$  визначаються таким чином:

$$H_x = \pm A^\pm \frac{\pi}{a} \sin \frac{\pi x}{a} \exp \left[ j \left( \omega t \mp \beta z + \varphi^\pm \right) \right]$$

$$H_z = -j A^\pm \left( \frac{\pi}{a} \right)^2 \frac{1}{\gamma} \cos \frac{\pi x}{a} \exp \left[ j \left( \omega t \mp \beta z + \varphi^\pm \right) \right]$$

де  $A$  – амплітуда хвилі;  $\beta$  – стала поширення;  $\varphi$  – початкова фаза; верхній та нижній індекси відносяться відповідно до хвиль, які поширюються у напрямку збільшення та зменшення координати  $z$ .

Якщо амплітуду складової  $H_z$  прийняти рівної одиниці, тоді

$$H_x = \pm j \frac{2a}{\Lambda} \sin \frac{\pi x}{a} \exp \left[ j \left( \omega t \mp \beta z + \varphi^\pm \right) \right]$$

$$H_z = \cos \frac{\pi x}{a} \exp \left[ j \left( \omega t \mp \beta z + \varphi^\pm \right) \right]$$

де  $\Lambda$  – довжина хвилі в хвилеводі.

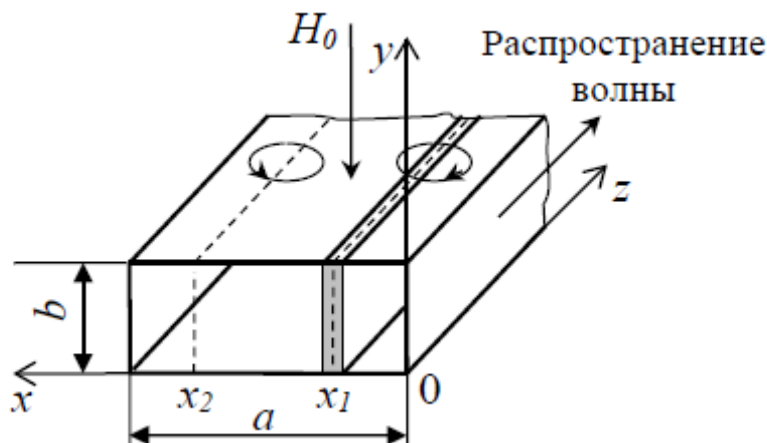


Рисунок 1.3 – Положення площин кругової поляризації у прямокутному хвилеводі

Наявність множника  $\pm j$  у рівнянні вказує на те, що компоненти поля  $H_z$  та  $H_x$  зсунуті по фазі відносно один одного відповідно на  $\pm 90^\circ$ . Таким чином, існують дві симетричні площини  $x_1$  і  $x_2$  (рис.1.3), в яких амплітуди компонент однакові  $H_z = H_x$  і поле  $H$  має кругову поляризацію. Положення цих площин можна визначити, прирівнюючи амплітуди компонентів

$$\frac{2a}{\Lambda} \sin \frac{\pi x}{a} = \cos \frac{\pi x}{a}$$

і знаходячи коріння цього рівняння

$$x_1 = \frac{a}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\Lambda}{2a}, \quad x_2 = a - x_1$$

У площинах  $x_1$  і  $x_2$  кожному напрямку поширення хвилі відповідає певний напрямок кругової поляризації. При такому розміщенні феритової пластини і такому напрямку поширення хвилі, як це зазначено на рис.1.3, у фериті буде правополяризоване поле і фазова швидкість буде визначатися  $\mu^+$ . Для хвилі, яка буде поширюватися у зворотному напрямку, поле у фериті буде лівополяризованим і фазова швидкість буде визначатися  $\mu^-$ . Оскільки  $\mu^+$  та  $\mu^-$  мають різні значення, то й фазовий зсув на одиницю довжини феритової пластини при прямому та зворотному напрямках поширення хвилі буде різним, тобто невзаємним.

## 1.2 Особливості конструкції пристроїв НВЧ

Ферити використовуються в таких НВЧ пристроях як вентиля, циркулятори, фазообертачі.

Феритові вентиля класифікують за принципом дії на такі:

- резонансний вентиль;
- вентиль зі зсувом поля;
- вентиль, оснований на ефекті Фарадея.

Феритовий резонансний вентиль. В прямокутному хвилеводі, який працює на хвилі  $H_{10}$ , існує дві поздовжні площини, паралельні вузькій стінці хвилевода, де магнітне поле має кругову поляризацію. Ці площини розташовано на відстані

$$x = \frac{a}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\lambda_B}{2a} \text{ від вузьких стінок.}$$

Напрямок обертання  $H$  в кожному зі вказаних поздовжніх площин взаємно протилежний і залежить від напрямку руху хвилі в хвилеводі. Розташуємо в хвилеводі в одній з двох указаних площин феритову пластинку, намагнічену перпендикулярно широкій стінці хвилеводу при  $H_0 = H_{PE3}$ . В цьому випадку ферит буде поглинати потужність хвилі, яка створює право поляризоване високочастотне магнітне поле. Хвиля, яка поширюється вздовж хвилеводу у протилежному напрямку зазнає мале згасання. Серійні феритові вентиля в смузі частот  $10 \dots 15\% f_0$  забезпечують в прямому напрямку згасання не більш 0,5 дБ, в зворотному напрямку 20 дБ и  $K_{ст} = 1,08 \dots 1,1$ .

Вентиль зі зсувом поля. Для отримання вентиля, який оснований на ефекті зсуву поля, до поверхні фериту приклеєна плівка поглинаючого матеріалу, в якій відбувається поглинання хвилі одного напрямку (припустимо, відбитої). Ферит працює в режимі, коли  $H_0 < H_{PE3}$ . При цьому відбувається витіснення з фериту поля падаючої хвилі і концентрація в фериті поля відбитої хвилі. На поверхні фериту напруженість електричного поля падаючої хвилі близька до нуля, а відбита хвиля має велике значення. Згасання в вентилі хвиль обраного напрямку

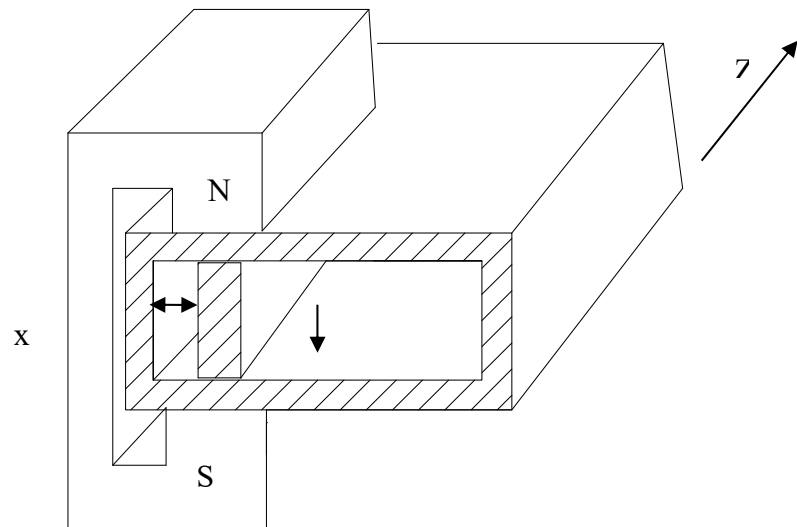


Рисунок 1.4 – Феритовий резонансний вентиль

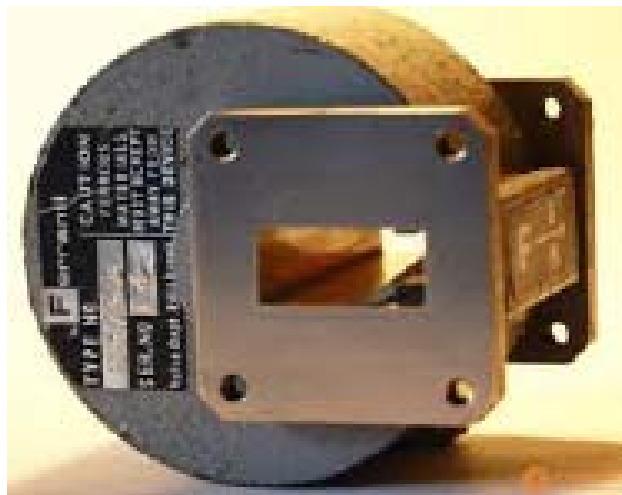


Рисунок 1.5 – Конструкція резонансного феритового вентиля

залежить від параметрів поглинаючого матеріалу. Перевагами цього вентиля у порівнянні з резонансним є менші значення намагнічуючого поля  $H_0$  (що зменшує габарити і масу цього пристрою) і більш широка смуга робочих частот, яка досягає 20–25%.

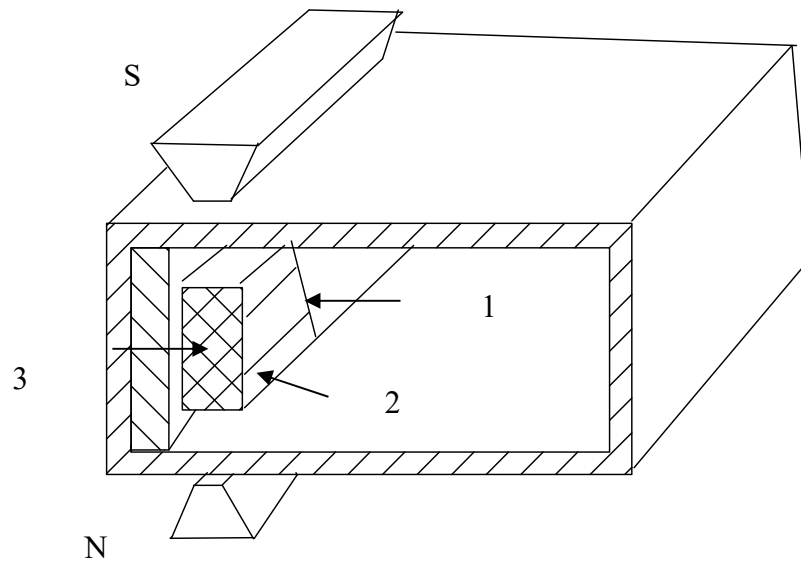


Рисунок 1.6 – Вентиль зі зсувом поля

1 – поглинач, 2 – ферит, 3 – діелектрик.

Вентиль на ефекті Фарадея представляє собою круглий хвилевід, вздовж осі якого розташований тонкий стрижень, намагнічений в поздовжньому напрямку постійним магнітним полем  $H_0$ .

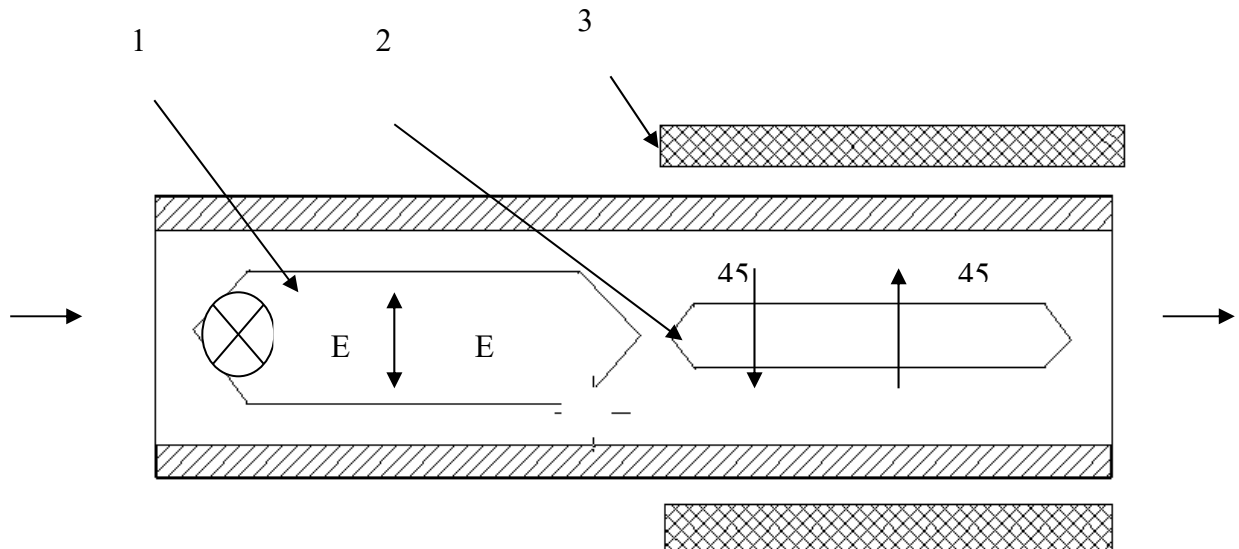


Рисунок 1.7 – Вентиль на ефекті Фарадея

1 – поглинаюча пластина, 2 – ферит, 3 – намагнічуюча обмотка.

### 1.3 Приклад традиційного розрахунку конструкції резонансного феритового вентиля

Розглянемо хвилевод перерізом 90мм x 45 мм, діапазон частот 2,3-3,3 ГГц, намагніченість насичення  $M_S = 43$  кА/м, ширина кривої поглинання феромагнітного резонансу на половинному рівні  $\Delta H = 23,9$  кА/м. Знайти зворотні втрати, прямі втрати, вентильне співвідношення [4, 5].

Для подальших розрахунків потрібно перейти від частоти до довжини хвилі за відомим співвідношенням

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,6 \cdot 10^9} = 0,115 \text{ м};$$

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,3 \cdot 10^9} = 0,13 \text{ м};$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с швидкість світла,  $f$  частота виражена у гігагерцах.

Розраховується положення центра феритового вкладиша у хвилеводі  $x_0$  для середини робочого діапазона (довжини хвилі  $\lambda$ ):

$$x_0 = \frac{a}{\pi} \arctg \frac{\sqrt{1 - (\lambda / 2a)^2}}{\lambda / 2a} = \frac{0,09}{\pi} \arctg \frac{\sqrt{1 - (0,115/0,18)^2}}{0,115/0,18} = 0,025 \text{ м. (1.2)}$$

Оптимальне положення феритового вкладиша, що забезпечує максимальне значення вентильного співвідношення, відповідає значенню  $x_0 / a = 0,25$ , ( $\lambda / a = \sqrt{2}$ ).

Зауваження: довжина хвилі і переріз хвилеводу повинні бути в однакових одиницях вимірювання, наприклад, в метрах.

З рівнянь аналогічних (1.2) визначаємо положення площин кругової поляризації на краю завданого діапазона  $x_1$  для  $\lambda_1$

$$x_1 = \frac{a}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 - (\lambda_1 / 2a)^2}}{\lambda_1 / 2a} = \frac{0,09}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 - (0,13/0,18)^2}}{0,13/0,18} = 0,022 \text{ м.};$$

Обирається відносна ширина феритових пластин  $2m / a \leq 0,3 \dots 0,4$

$$m = \frac{a}{2} \cdot 0,3 = 0,003 \text{ м.}$$

Відносна товщина пластини обирається з умови  $n / b \leq 0,05 \dots 0,1$  і уточнюється при тепловому розрахунку, якщо вентиль призначений для роботи на високому рівні потужності.

$$n = b \cdot 0,05 = 0,0225 \text{ м.}$$

Визначається довжина пластини

$$l_\phi = \lambda_B = \frac{0,115}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,115}{0,180}\right)^2}} = 0,148 \text{ м.}$$

Визначається значення магнітного поля по середній частоті завданого діапазону:

$$H^i = \frac{f}{\gamma} = \frac{2600}{35} = 74,286 \text{ кА/м.}$$

де  $\gamma = 35,17 \text{ МГц}/(\text{кА} \cdot \text{м}^{-1})$  – гіромагнітне відношення електрона, яке визначається відношенням його магнітного моменту до механічного.

Зауваження: при розрахунках виразити частоту у мегагерцах.

Відносне внутрішнє поле і намагніченість насичення для середньої частоти діапазона рівні відповідно:

$$\sigma = 1;$$

$$p = \frac{\gamma M_s}{f} = \frac{35 \cdot 43}{2600} = 0,579;$$

Припустимо параметр втрат обраної марки фериту

$$\delta = 0,01;$$

Для розрахунку згасання електромагнітного поля в вентилі необхідно визначити значення мнимих складових тензора  $\mu$

$$\mu_1'' = \frac{\delta p (\sigma^2 + 1)}{\left[ (\sigma^2 - 1)^2 + 4\sigma^2 \frac{\delta^2}{1 + \delta^2} \right]} = \frac{0,01 \cdot 0,654 \cdot (1,13^2 + 1)}{\left[ (1,13^2 - 1)^2 + 4 \cdot 1,13^2 \frac{0,01^2}{1 + 0,01^2} \right]} = 28,9$$

$$k_1'' = - \frac{2\delta p \sigma}{\left( \sigma^2 - 1 \right)^2 + 4\sigma^2 \frac{\delta^2}{1 + \delta^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \delta^2}} =$$

$$- \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 0,654 \cdot 1,13}{\left[ (1,13^2 - 1)^2 + 4 \cdot 1,13^2 \frac{0,01^2}{1 + 0,01^2} \right] \cdot \sqrt{1 + 0,01^2}} = -28,9;$$

Розраховується зворотне загасання

$$L_{обр} = \frac{8,7 \cdot 2 \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \cdot n}{b \cdot a} \frac{\sin \pi \frac{\pi 2m}{a}}{\sin \pi \frac{\pi 2x_1}{a}}$$

$$\cdot \left[ \mu_1'' \left( \frac{\frac{\pi 2m}{a}}{\sin \pi \frac{2m}{a}} - \cos \pi \frac{2x_1}{a} \cos \pi \frac{2x_0}{a} \right) - k_1'' \sin \pi \frac{2x_{1,2}}{a} \sin \pi \frac{2x_0}{a} \right] =$$

$$\cdot$$

$$= 17,5 \text{ дБ};$$

Розраховується пряме згасання

$$L_{обр} = \frac{8,7 \cdot 2 \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \cdot n}{b \cdot a} \frac{\sin \pi \frac{\pi 2m}{a}}{\sin \pi \frac{\pi 2x_1}{a}}$$

$$\cdot \left[ \mu_1'' \left( \frac{\frac{\pi 2m}{a}}{\sin \pi \frac{2m}{a}} - \cos \pi \frac{2x_1}{a} \cos \pi \frac{2x_0}{a} \right) + k_1'' \sin \pi \frac{2x_{1,2}}{a} \sin \pi \frac{2x_0}{a} \right] =$$

$$\cdot$$

$$= 0,294 \text{ дБ};$$

Розраховується вентильне співвідношення

$$B = \frac{\mu'' \left( \frac{\pi \frac{2m}{a}}{\sin \pi \frac{2m}{a}} - \cos \pi \frac{2x_1}{a} \cos \pi \frac{2x_0}{a} \right) - k'' \sin \pi \frac{2x_{1,2}}{a} \sin \pi \frac{2x_0}{a}}{\mu'' \left( \frac{\pi \frac{2m}{a}}{\sin \pi \frac{2m}{a}} - \cos \pi \frac{2x_1}{a} \cos \pi \frac{2x_0}{a} \right) + k'' \sin \pi \frac{2x_{1,2}}{a} \sin \pi \frac{2x_0}{a}} = 262$$

$$L_{звор} = \frac{8.7 \cdot 2 \cdot l_f \cdot n \sin \frac{\pi 2m}{a}}{b \cdot a \sin \frac{\pi 2x_1}{a}}$$

$$\left[ \mu_1'' \left( \frac{\pi \frac{2m}{a}}{\sin \frac{2m}{a}} - \cos \frac{\pi 2x_1}{a} \cos \frac{\pi 2x_0}{a} \right) - k_1'' \sin \frac{\pi 2x_{1,2}}{a} \sin \frac{\pi 2x_0}{a} \right], \quad (1.3)$$

Після проведених розрахунків конструкції і параметрів резонансного феритового вентиля за методикою Вамберського М.В. можна відзначити інженерну спрямованість методики. Перевагою моделі і формул є звичні позначення змінних і орієнтації осей, використання системних одиниць і посилання на вітчизняні марки феритів, перетини хвилеводів. Але ця формула суттєво відрізняється від відомої у всьому іншому світі.

У лекціях [6–8] та інших закордонних джерелах формула для втрат феритового вентиля має вигляд

$$\alpha_{\pm} = \frac{\Delta S}{S \beta_0} \left[ \beta_0^2 \chi_{xx}'' \sin^2 k_c x + k_c^2 \chi_{zz}'' \cos^2 k_c x \mp \chi_{xy}'' k_c \beta_0 \sin 2k_c x \right], \quad (1.4)$$

Перевагою формули (2.2) є те, що зрозуміло, як вона виведена, є приклади розрахунків з числовими значеннями, призначені для навчання, є реалізації в

конструкції пристроїв. Недоліком є те, що, по-перше, позначення змінних відрізняються від звичних у вітчизняній літературі, по-друге, різна орієнтація осей, по-третє, різні одиниці вимірювання (несистемні в порівнянні з одиницями системи СІ дюйми та ерстеди), а також різні числові значення, що стосується перетину хвилеводу та інше.

Проведемо порівняльний аналіз, щоб виявити зв'язок між виразами для втрат у фериті (1.3) і (1.4). Це протиріччя між різними виразами для втрат у прямому та зворотному напрямку та вентиляного співвідношення становить проблему даного дослідження.

## 2 МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РОЗРОБКА ОСНОВНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА СПІВВІДНОШЕНЬ

2.1 Аналітичне виведення та гармонізація виразів для втрат в прямому та зворотному напрямку та вентиляного співвідношення

Об'єктом дослідження є резонансний феритовий вентиль на прямокутному хвилеводі (рис.2.1). Для посилення ефекту біля протилежних широких стінок хвилеводу розміщують не одну, а дві пластини. На рисунку показано розташування і позначення розмірів феритових пластин; вони знадобляться для виведення подальших формул. Показано поперечний переріз прямокутного хвилеводу, а не показана система зовнішнього постійного магніту, як на фото на рис.2.1, яка являє собою постійний магніт у формі циліндра, що охоплює прямокутний хвилевід. Його наявність при побудові моделі враховано як зовнішнє постійне магнітне зміщення, а змінне магнітне поле існує всередині хвилеводу, воно створюється електромагнітною хвилею, яка генерується в джерелі і частково поглинається, а частково відбивається в кінці мікрохвильового тракту [9].

Будемо вважати, що хвиля поширюється в хвилеводі вздовж  $z$ ; враховуємо, що структура поля типу основної хвилі в прямокутному хвилеводі для  $H_x, H_z, E_z$

$$\begin{aligned}
 E_y^0 &= \sin k_{0x}x \cdot e^{-j\gamma_{y0}z} \\
 H_x^0 &= \frac{\gamma_{y0}}{\omega\mu_0} \sin k_{0x}x \cdot e^{-j\gamma_{y0}z} \\
 H_z^0 &= -\frac{\gamma_{y0}}{\omega\mu_0} \cos k_{0x}x \cdot e^{-j\gamma_{y0}z}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

$$\text{де } k_{0x} = \frac{\pi}{a}, \quad \gamma_{y0} = \sqrt{k_0^2 - k_{0x}^2}$$

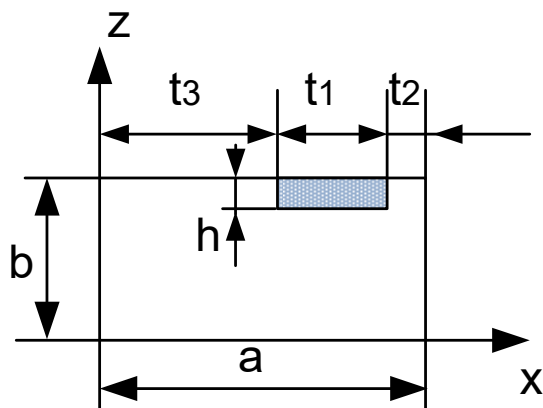


Рисунок 2.1 – Конструкція феритового резонансного вентиля

У результаті дослідження виявилось, що відправною точкою для виведення формули з джерела [4] є формула з джерела [6], подібна до формули (1.4)]. Спробуємо вивести формулу (1.3).

У [6] наведено формулу для константи розповсюдження з доказами, яку можна взяти за відправну точку нашого дослідження.

$$\gamma_y = \gamma_{y0} + \frac{h}{ab} \left\{ \frac{1}{2} \mu'' \left[ \left( \gamma_{y0} + \frac{k_{0x}^2}{\gamma_{y0}} \right) + \left( \frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} - \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} \right) \sin k_{0x} t_1 \cdot \cos k_{0x} (2t_3 + t_1) \right] - k'' \cdot \sin k_{0x} t_1 \sin k_{0x} (2t_3 + t_1) \right\} \quad (2.4)$$

Ця формула з [6] подібна до формули з [7, 8].

Для перетворення формули (2.4) подібної до формули (1.4) у формулу (1.3) пропонуються такі кроки:

- винести у виразі (2.4) за перші круглі дужки  $k_{0x}$  ;
- помножити та поділити на  $\sin k_{0x}t_1$  перший член у перших круглих дужках (2.4);
- винести за фігурні дужки  $\sin k_{0x}t_1$  ;
- перетворити другі круглі дужки в тригонометричний вираз  $\frac{\cos 2k_{0x}x_1}{\sin 2k_{0x}x_1}$  ;
- перетворити перші круглі дужки на  $\frac{1}{\sin 2k_{0x}x_1}$  ;
- помножити та поділити на  $\sin 2k_{0x}t_1$  останній член в виразі (2.4);
- винести за фігурні дужки  $\frac{1}{\sin 2k_{0x}x_1}$  .

Перший крок – винести загальний множник у виразі (2.4) за дужку, в результаті ми отримаємо

$$\gamma_y = \gamma_{y0} + \frac{h}{ab} \left\{ \frac{1}{2} \mu'' \left[ \left( \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} + \frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} \right) k_{0x} t_1 + \left( \frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} - \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} \right) \sin k_{0x} t_1 \cdot \cos k_{0x} (2t_3 + t_1) \right] - \right. \\ \left. - k'' \cdot \sin k_{0x} t_1 \sin k_{0x} (2t_3 + t_1) \right\} \quad (2.5)$$

Другим кроком є множення та ділення на одне й те саме число першого члена в квадратних дужках виразу (2.5)

$$\gamma_y = \gamma_{y0} + \frac{h}{ab} \left\{ \frac{1}{2} \mu'' \left[ \left( \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} + \frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} \right) k_{0x} t_1 \frac{\sin k_{0x} t_1}{\sin k_{0x} t_1} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} - \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} \right) \sin k_{0x} t_1 \cdot \cos k_{0x} (2t_3 + t_1) \right] - k'' \cdot \sin k_{0x} t_1 \sin k_{0x} (2t_3 + t_1) \right\}, \quad (2.6)$$

Третій крок – винести за квадратні дужки спільний множник

$$\gamma_y = \gamma_{y0} + \sin k_{0x} t_1 \cdot \frac{h}{ab} \left\{ \frac{1}{2} \mu'' \left[ \left( \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} + \frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} \right) k_{0x} t_1 \frac{1}{\sin k_{0x} t_1} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} - \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} \right) \cos k_{0x} (2t_3 + t_1) \cdot \cos k_{0x} (2t_3 + t_1) \right] - k'' \cdot \sin k_{0x} t_1 \sin k_{0x} (2t_3 + t_1) \right\}, \quad (2.7)$$

Крок четвертий. Найважливіша заміна відбувається тому, що ми виражаємо співвідношення поперечних і поздовжніх констант розповсюдження через тригонометричні функції, щоб не було радикала від дисперсії в прямокутному хвилеводі.

На крайній частоті діапазону знову буде кругова поляризація, але площина кругової поляризації зміститься в порівнянні з положенням площини кругової поляризації на центральній частоті. Це нове положення площини поляризації на крайню частоту позначимо  $x_1$ . З виразів (2.3) отримуємо

$$\gamma_{y0} = \frac{H_x \cdot \omega \cdot \mu_0}{\sin k_{0x} x_1}, \\ k_{0x} = \frac{-H_z \cdot \omega \cdot \mu_0}{\cos k_{0x} x_1}.$$

Отже

$$\frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} = \frac{\cos k_{0x}x_1}{\sin k_{0x}x_1} \cdot \frac{H_z}{H_x}$$

Відомо, що у феритовому вентилі феритова пластина розташована в площині кругової поляризації, де  $H_x = H_z$ , тому відношення напруженості магнітного поля дорівнює одиниці, звідки залежить точне положення площини кругової поляризації. визначається місце розташування феритової пластини. Положення площини кругової поляризації в хвилеводі визначається як рішення тригонометричного рівняння, що містить тангенс.

Виходячи з рівності  $H_x = H_z$ , отримуємо

$$\frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} = \frac{\cos k_{0x}x_1}{\sin k_{0x}x_1}$$

Розглянемо  $\frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} + \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}}$  Як тригонометричні функції, тангенси та

котангенси мають розриви, тому синуси та косинуси краще залишити.

$$\frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} + \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} = \frac{\cos k_{0x}x_1}{\sin k_{0x}x_1} + \frac{\sin k_{0x}x_1}{\cos k_{0x}x_1} = \frac{\cos^2 k_{0x}x_1 + \sin^2 k_{0x}x_1}{\cos k_{0x}x_1 \sin k_{0x}x_1}$$

Основною тригонометричною тотожністю є

$$\cos^2 k_{0x}x_1 + \sin^2 k_{0x}x_1 = 1$$

Вираз для синуса подвійного кута  $\epsilon$

$$\cos k_{0x}x_1 \sin k_{0x}x_1 = \frac{1}{2} \sin 2k_{0x}x_1$$

Звідси отримуємо

$$\left( \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} + \frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} \right) = \frac{2}{\sin 2k_{0x}t_1}, \quad (2.8)$$

Тоді, підставивши (2.8) у вираз (2.7), отримаємо

$$\begin{aligned} \gamma_y = \gamma_{y0} + \sin k_{0x}t_1 \cdot \frac{h}{ab} \left\{ \frac{1}{2} \mu'' \left[ \frac{1}{\sin 2k_{0x}t_1} k_{0x}t_1 \frac{1}{\sin k_{0x}t_1} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} - \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} \right) \cdot \cos k_{0x}(2t_3 + t_1) \right] - k'' \cdot \sin k_{0x}t_1 \sin k_{0x}(2t_3 + t_1) \right\}, \quad (2.9) \end{aligned}$$

П'ятий крок схожий на четвертий.

Розглянемо  $\frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} - \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}}$

$$\frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} - \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} = \frac{\cos k_{0x}x_1}{\sin k_{0x}x_1} - \frac{\sin k_{0x}x_1}{\cos k_{0x}x_1} = \frac{\cos^2 k_{0x}x_1 - \sin^2 k_{0x}x_1}{\cos k_{0x}x_1 \sin k_{0x}x_1}$$

Вираз косинуса подвійного кута  $\epsilon$

$$\cos^2 k_{0x}x_1 - \sin^2 k_{0x}x_1 = \cos 2k_{0x}x_1$$

Вираз синуса подвійного кута  $\epsilon$

$$\cos k_{0x}x_1 \sin k_{0x}x_1 = \frac{1}{2} \sin 2k_{0x}x_1$$

Звідси отримуємо

$$\left( \frac{\gamma_{y0}}{k_{0x}} - \frac{k_{0x}}{\gamma_{y0}} \right) = \frac{2 \cdot \cos 2k_{0x}t_1}{\sin 2k_{0x}t_1}, \quad (2.10)$$

Підставивши (2.10) у (2.9), отримаємо

$$\begin{aligned} \gamma_y = \gamma_{y0} + \sin k_{0x}t_1 \cdot \frac{h}{ab} \left\{ \frac{1}{2} \mu'' \left[ \frac{2}{\sin 2k_{0x}t_1} k_{0x}t_1 \frac{1}{\sin k_{0x}t_1} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2 \cos 2k_{0x}x_1}{\sin 2k_{0x}x_1} \cdot \cos k_{0x}(2t_3 + t_1) \right] - k'' \cdot \sin k_{0x}(2t_3 + t_1) \right\}, \quad (2.11) \end{aligned}$$

Шостий крок полягає в множенні та діленні останнього члена на  $\sin 2k_{0x}t_1$ , який тепер буде в знаменнику кожного члена

$$\begin{aligned} \gamma_y = \gamma_{y0} + \sin k_{0x}t_1 \cdot \frac{h}{ab} \left\{ \frac{1}{2} \mu'' \left[ \frac{2}{\sin 2k_{0x}t_1} k_{0x}t_1 \frac{1}{\sin k_{0x}t_1} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{2 \cos 2k_{0x}x_1}{\sin 2k_{0x}x_1} \cdot \cos k_{0x}(2t_3 + t_1) \right] - k'' \cdot \sin k_{0x}(2t_3 + t_1) \frac{\sin 2k_{0x}x_1}{\sin 2k_{0x}x_1} \right\}, \quad (2.12) \end{aligned}$$

Сьомий крок — винести за квадратні дужки спільний множник  $\frac{1}{\sin 2k_{0x}x_1}$

$$\gamma_y = \gamma_{y0} + \sin k_{0x} t_1 \cdot \frac{1}{\sin 2k_{0x} t_1} \cdot \frac{h}{ab} \left\{ \frac{1}{2} \mu'' \left[ k_{0x} t_1 \frac{1}{\sin k_{0x} t_1} + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos 2k_{0x} x_1 \cdot \cos k_{0x} (2t_3 + t_1) \right] - k'' \cdot \sin k_{0x} (2t_3 + t_1) \sin 2k_{0x} x_1 \right\}, \dots (2.13)$$

Нарешті, ми перетворюємо нотацію в нотацію з [4] Ширина феритової пластини становить  $2m = t_1$ , а положення центру пластини у хвилеводі становить

$$x_0 = t_3 + \frac{t_1}{2}, \quad 2x_0 = 2t_3 + t_1, \quad n = h.$$

$m$  – постійна величина, оскільки це розмір пластини, а  $x_1$  – змінна, яка позначає положення площини кругової поляризації над ділянкою хвилеводу.

Для верифікації проведених розрахунків промодельюємо в MathCad резонансний вентиль Н-площини для роботи на частоті 9 ГГц, використовуючи одну феритову пластину довжиною  $L$  і поперечним перерізом  $0,187'' \times 0,032''$ . Він приєднаний до нижньої широкої стінки хвилеводу Х-діапазону ( $a=0,90''$ ,  $b=0,40''$ ) у  $X_0$ . Феритовий матеріал має ширину лінії  $\Delta H = 250$  Ое і намагніченість насичення  $4\pi M_s = 1900$  Г. Знайдіть значення  $R_{\max}''\alpha^-$  і  $\alpha^+$ . Якщо зворотне загасання становить 25 дБ, знайти довжину  $L$  плити [8].

$$\gamma_y = \gamma_{y0} + \frac{n}{ab} \cdot \sin \frac{\pi}{a} 2m \cdot \frac{1}{\sin 2k_{0x} t_1} \left\{ \mu'' \left[ \frac{\pi}{a} 2m \frac{1}{\sin \frac{\pi}{a} 2m} + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos 2k_{0x} t_1 \cdot \cos \frac{\pi}{a} 2x_0 \right] - k'' \cdot \sin k_{0x} t_1 \sin \frac{\pi}{a} 2x_0 \right\}, \quad (2.14)$$

Вираз (2.14) ідентичний виразу (1.3), який потрібно було довести.

А тепер виконаємо моделювання в MathCad з метою верифікації отриманих результатів аналітичних розрахунків.

## Програма 1

$$\chi_X := 7.60\%$$

$$\chi_Y := 7.59\%$$

магнітна сприйнятливість

$$\Delta s := 0.187 \cdot 0.032$$

$$n := 0.032$$

$$m := \frac{0.187}{2}$$

розміри феритової пластини в перерізі

$$a := 0.9$$

$$b := 0.4$$

$$x := \frac{a}{4} = 0.225$$

розміри хвилевода

$$\frac{\Delta s}{a \cdot b} = 0.017$$

відношення переріза пластини до переріза хвилевода

$$\lambda_0 := \frac{3 \cdot 10^8}{9 \cdot 10^9} = 0.033$$

$$\lambda := \frac{3.3}{2.54} = 1.299$$

довжина хвилі

$$k_0 := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} = 4.836$$

$$k_c := \frac{\pi}{a} = 3.491$$

постійні розповсюдження про  
дольна та поперечна

$$\beta := \sqrt{k_0^2 - k_c^2} = 3.347$$

коефіцієнти загасання в прямому та зворотному напрямку

$$\alpha := \left[ \beta^2 \cdot \chi_X \cdot (\sin(k_c \cdot x))^2 + k_c^2 \cdot \chi_Z \cdot (\cos(k_c \cdot x))^2 + k_c \cdot \beta \cdot \chi_Y \cdot \sin(2 \cdot k_c \cdot x) \right] \cdot \frac{0.0166}{\beta}$$

$$\alpha = 0.682$$

$$\alpha_n := \left( \beta^2 \cdot \chi_X \cdot \sin(k_c \cdot x)^2 + k_c^2 \cdot \chi_Z \cdot \cos(k_c \cdot x)^2 - k_c \cdot \beta \cdot \chi_Y \cdot \sin(2 \cdot k_c \cdot x) \right) \cdot \frac{0.0166}{\beta}$$

$$\alpha_n = -0.199$$

допоміжні обчислення

$$\frac{\Delta s}{a \cdot b \cdot \beta} \cdot \beta^2 \cdot \chi_X = 0.423$$

$$\frac{\Delta s}{a \cdot b \cdot \beta} \cdot \chi_X \cdot k_c^2 = 0.46$$

$$\frac{\Delta s}{a \cdot b \cdot \beta} \cdot \chi_X \cdot k_c \cdot \beta = 0.441$$

коефіцієнти загасання в прямому та зворотному напрямку з врахуванням допоміжних обчислень та у вигляді функцій для побудови графіків

$$\alpha_1(x) := 3.602 \sin\left(\pi \cdot \frac{x}{a}\right)^2 + 4.0763 \cos\left(\pi \cdot \frac{x}{a}\right)^2 + 3.829 \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{a}\right)$$

$$\alpha_2(x) := \left( 3.602 \sin\left(\pi \cdot \frac{x}{a}\right)^2 + 4.0763 \cos\left(\pi \cdot \frac{x}{a}\right)^2 - 3.829 \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{a}\right) \right)$$

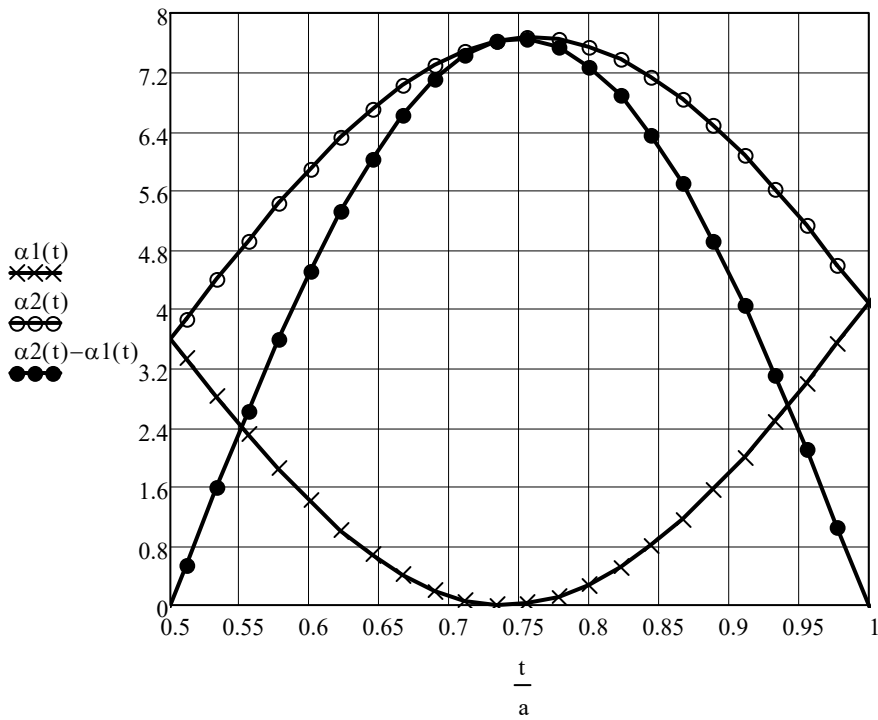


Рисунок 2.2 – Прямі, зворотні втрати, та вентильне співвідношення, отримані за методикою з літературного джерела [8]

Програма 2

втрати в прямому та зворотному напрямку за другою методикою

$$\lambda_5 := \frac{3 \cdot 10^8}{9 \cdot 10^9} = 0.033 \qquad \lambda_1 d := \frac{\lambda_5 \cdot 100}{2.54} = 1.312$$

$$x := \frac{a}{\pi} \cdot \operatorname{atan} \left[ \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot a}\right)^2}}{\frac{\lambda}{2 \cdot a}} \right] = 0.219$$

$$x_1 := \frac{a}{\pi} \cdot \operatorname{atan} \left[ \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_1 d}{2 \cdot a}\right)^2}}{\frac{\lambda_1 d}{2 \cdot a}} \right] = 0.216$$

$$\alpha_3(x) := 8.7 \cdot \frac{n}{b \cdot a} \cdot \frac{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{a} \cdot m\right)}{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{a} \cdot x_1\right)} \left[ \operatorname{xx} \left( \frac{\frac{2 \cdot \pi}{a} \cdot m}{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{a} \cdot m\right)} - \cos\left(\frac{\pi \cdot 2}{a} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot 2}{a} \cdot x_1\right) \right) + xy \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 2}{a} \cdot x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 2}{a} \cdot x_1\right) \right]$$

$$\alpha_4(x) := 8.7 \cdot \frac{n}{b \cdot a} \cdot \frac{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{a} \cdot m\right)}{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{a} \cdot x_1\right)} \left[ \operatorname{xx} \left( \frac{\frac{2 \cdot \pi}{a} \cdot m}{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{a} \cdot m\right)} - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{a} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot 2}{a} \cdot x_1\right) \right) - xy \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 2}{a} \cdot x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 2}{a} \cdot x_1\right) \right]$$

Максимальні зворотні втрати  $\alpha$ - становлять приблизно 7,75 дБ/дюйм. Таким чином, необхідна довжина фериту становить  $L=25 \text{ дБ}/7,75 \text{ дБ/дюйм} = 3,23''$ .

Співпадає двома методами з літератури [4] [8]

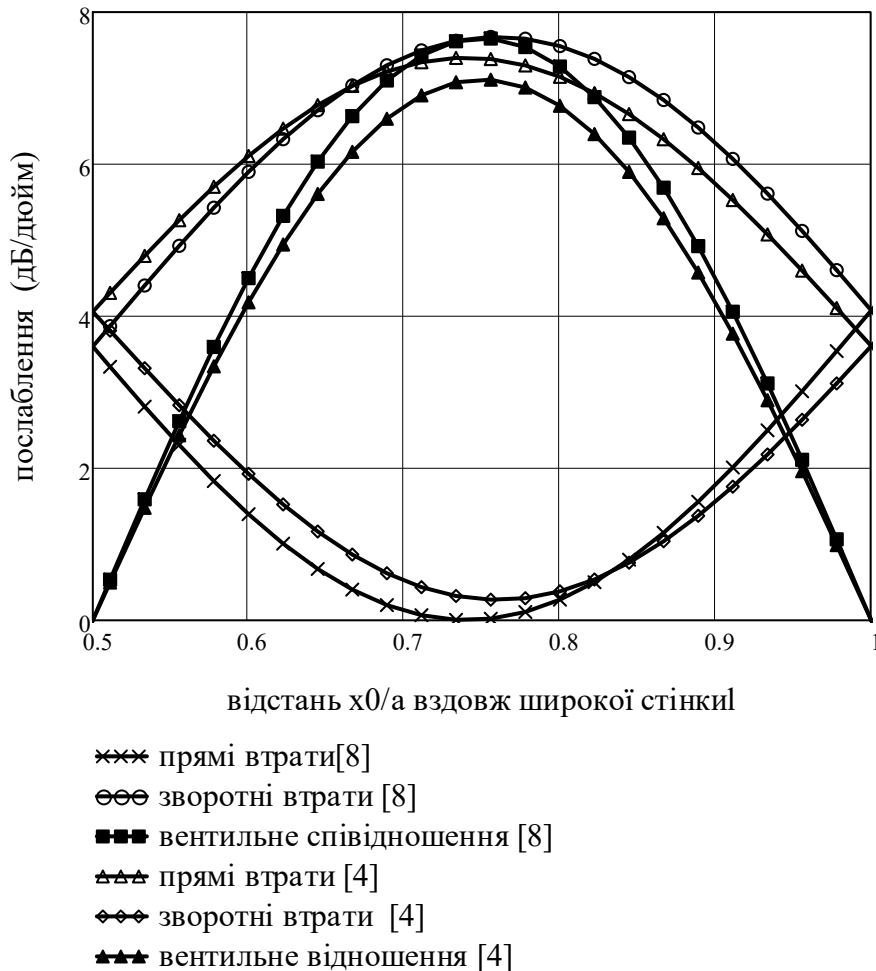
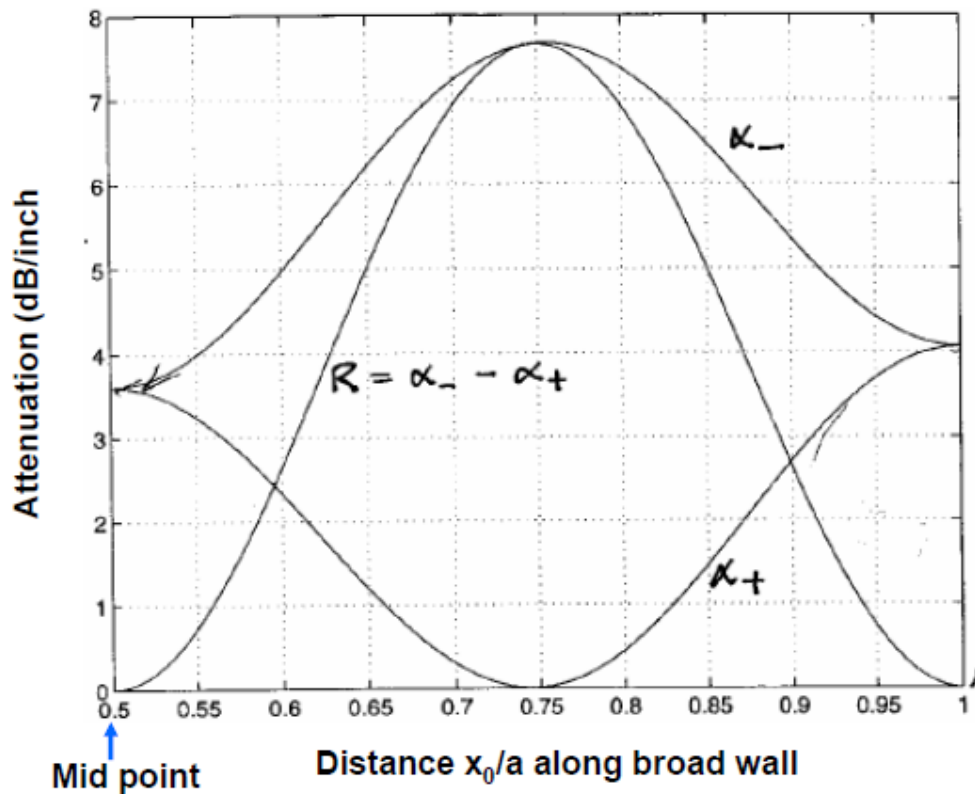


Рисунок 2.3 – Порівняння прямих і зворотних втрат, коефіцієнт вентиляції, наведений в [4] і [8] на середній частоті 9 ГГц

На рис.2.2 показані результати розрахунків за методикою з джерела [8]. Розрахунки виконані за програмою 1. Аналіз результатів показав співпадіння з результатами, позиченими з джерела [8] рис.2.4.

На рис.2.3 показані результати розрахунку прямиї, зворотних втрат за методикою з джерела [4] і там також наведені для порівняння результати за методикою [8]. Звертає мо увагу на співпадіння результатів.



The maximum reverse attenuation  $\alpha_-$  is approximately 7.75 dB/inch. Thus the necessary ferrite length is  $L=25\text{dB}/7.75\text{dB/in} = 3.23''$

Рисунок 2.4 – Прямі, зворотні втрати з [8]

Програма 3 містить формули для розрахунків магнітної сприйнятливості і носить довідковий але важливий характер.

Забезпечення широкої смуги частот є важливим питання проектування вентилів, тому на рис. 2.5, 2.6, 2.7 показано залежність ослаблення від відстані вздовж широкої стіни лівої крайньої частоти 8 ГГц (рис.2.5), для центральної частоти 9 ГГц (рис.2.6), правої крайньої частоти 12 ГГц (рис.2.7) і для перетин хвилеводу ( $a=0,90''$ ,  $b=0,40''$ ).

## Розрахунок магнітної сприйнятливості

$$\begin{array}{llll}
 f := 9 & f0 := 9 & fm := 5.32 & \text{частота в ГГц} \\
 \omega := 2 \cdot \pi \cdot f & \omega0 := 2 \cdot \pi \cdot f0 & \omega m := 2 \cdot \pi \cdot fm & \text{кругова частота} \\
 \alpha := 0.035 & & & \text{втрати}
 \end{array}$$

$$D1 := [f0^2 - f^2 \cdot (1 + \alpha^2)] + 4 \cdot f0^2 \cdot f^2 \cdot \alpha^2 = 39.794$$

$$\chi := \frac{(4 \cdot \pi^2) \cdot fm \cdot f \cdot \alpha \cdot [f0^2 + f^2 \cdot (1 + \alpha^2)]}{D1} = 300.336$$

$$T := \frac{1}{\alpha \cdot \omega}$$

$$\Delta := [(\omega0 \cdot T)^2 - (\omega \cdot T)^2 - 1]^2 + 4(\omega0 \cdot T)^2 = 2.631 \times 10^3$$

$$xx := \frac{\omega m \cdot T \cdot [(\omega0 \cdot T)^2 + (\omega \cdot T)^2 + 1]}{\Delta} = 7.581$$

$$xy := \frac{-2 \cdot \omega \cdot T \cdot \omega0 \cdot T \cdot \omega m \cdot T}{\Delta} = -7.575$$

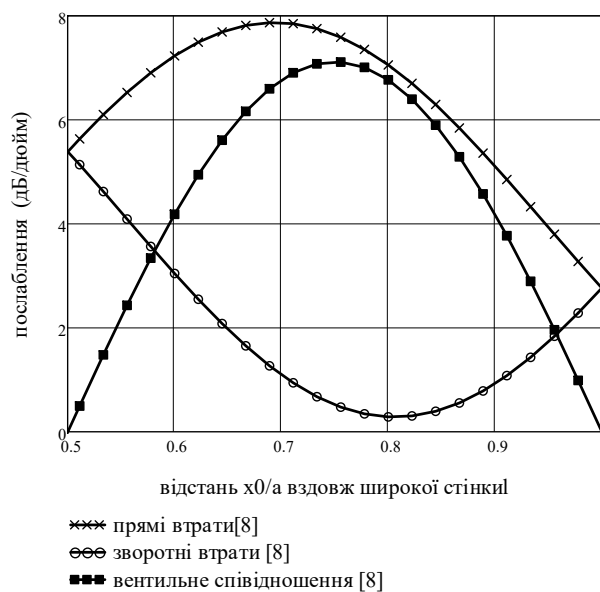


Рисунок 2.5 – Прямі, зворотні втрати та вентильне відношення для 8 ГГц

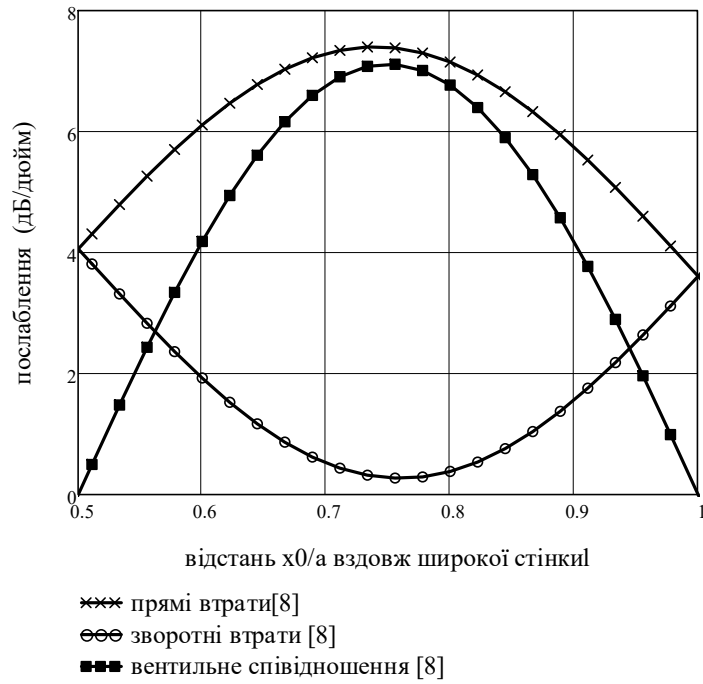


Рисунок 2.6 – Прямі, зворотні втрати та вентильне відношення для 9 ГГц

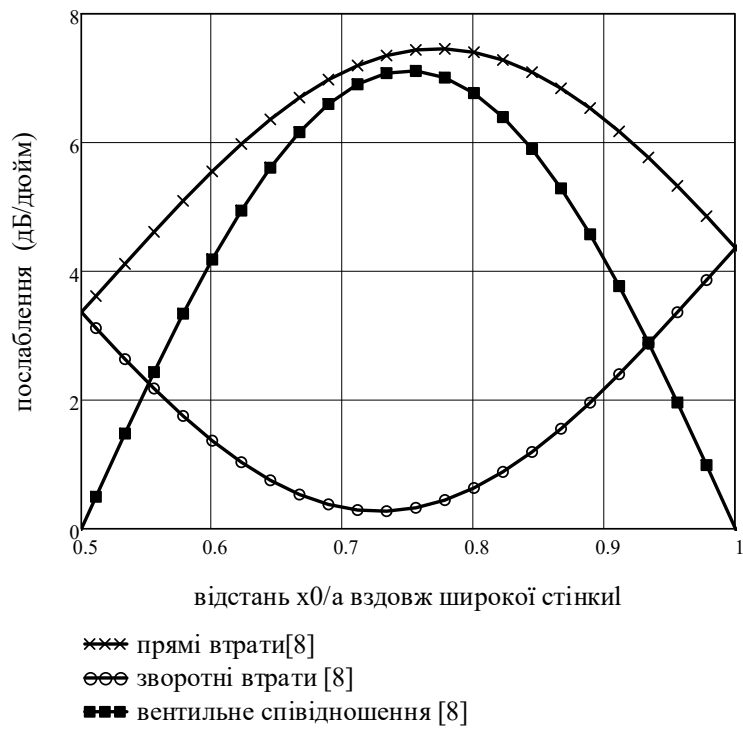


Рисунок 2.7 – Прямі, зворотні втрати та вентильне відношення для 10 ГГц

## 2.2 Моделювання та автоматизоване проектування феритового вентиля в ANSYS HFSS та його результати

Феритові вентиля на зсуві поля засновані на зміні розподілу НВЧ електричного поля при прямому й зворотному напрямках розповсюдження хвилі в лінії передачі з підмагніченою зовнішнім полем феритовою пластиною. Феритовий вентиль на прямокутному хвилеводі складається з підмагніченої полем феритової пластини, на бічній поверхні якої нанесений резистивний поглинаючий шар з поверхневим опором 100...200 Ом/м<sup>2</sup>. Положення феритової пластини фіксується діелектричною прокладкою з матеріалу з невисоким значенням  $\epsilon_a$  (кварці- витті скло, склотекстоліт). Амплітуда НВЧ електричного поля на поглинаючому шарі при прямому напрямку поширення близька до нуля (малі втрати), при зворотному - максимальна (більші втрати). Для роботи в сантиметровому діапазоні хвиль рекомендують вибирати марки феритів з досить високою намагніченістю насичення  $M_s$  200...300 кА/м і вузькою резонансною кривою  $\Delta H < 10$  ка/м. Припустимо використовувати марки з підвищеним значенням  $\text{tg}\delta$  [10].

Вентиль складається із хвилеводу, діелектричної пластинки, феритової пластинки й поглинаючої плівки. Діелектрична пластинка й ферит мають узгоджуючи скоси. Почнемо із креслення відрізка хвилеводу.

Для зручності креслення деякі елементи в процесі моделювання можна робити невидимими за допомогою команди View → Active View Visibility. Наприклад, у даній роботі при кресленні ферит- діелектричного вкладиша зручно приховувати елемент Vox1.

При кресленні будемо керуватися стандартними розмірами хвилевода 23мм × 10 мм. Для початку накреслите довільний паралелепіпед. Для цього:

– задайте команду Draw → Vox або натисніть на панелі інструментів віжповідну кнопку, після чого у вікні конструкції з'явиться ромбик;

– переміщаючи курсор за допомогою миші, помістіть ромбик у початок координат і клацніть лівою кнопкою, пересуньте курсор мишею й створіть прямокутник у площині XY, що є основою;

– далі, переміщаючи курсор уздовж осі Z, створіть паралелепіпед, завершіть креслення;

– оскільки накреслений нами паралелепіпед є довільним, потрібно змінити його розміри. Для цього зайдіть у вікно моделі, у відкритій вкладці Solids → vacuum → Box → Createbox натисніть правою кнопкою на Createbox, виберемо Properties, де введемо необхідні нам параметри, у цьому випадку Position (0, -5, 0); Xsize 23, Ysize 10, Zsize 100;

Тепер ми бачимо хвилевід довжиною 100 мм і поперечними розмірами 23мм × 10 мм. Якщо спочатку фігура була побудована в маленькому масштабі, то при зміні розмірів у більший бік вона займе все вікно конструкції. Щоб підігнати її під розмір, натиснемо комбінацію клавіш Ctrl+D. Для зручності можна розгорнути хвилевід, натиснувши кнопку Alt і спрямувавши вісь OZ по горизонталі. На цьому креслення хвилеводу закінчується.

Згідно з рекомендаціями по проектуванню вентилів зі зсувом поля, товщина діелектричної прокладки повинна бути рівна  $n_{\text{пр}} = 0,03 \dots 0,04a$ , оптимальна товщина феритової пластини для забезпечення мінімуму прямих втрат  $n = 0,15 \dots 0,16$  а, товщина резистивної плівки повинна бути  $n_{\text{пл}} = 0,001 \dots 0,002$  а . Висота феритового вкладиша  $h = 0,7b$  , що забезпечує високе вентиляне відношення й при наявності на кінцях пластини скосів загальною довжиною  $0,5 \lambda_{\text{в}}$  - гарне узгодження в смузі частот до 20 %. Довжина феритової пластини повинна бути порядку  $1,5 \lambda_{\text{в}}$ .

Виходячи з даних рекомендацій, прийнемо розміри:  $n_{\text{пр}} = 0,9$  мм,  $n = 3,45$ ,  $h = 7$  мм.

Оскільки довжина діелектричної пластинки не задана, враховуючи скіс для узгодження з феритом, оберемо її трохи більше довжини фериту  $l_{\text{пл}} = 71$  мм.

Далі виберемо площину креслення YZ. Після цього накреслимо прямокутник із координатами однієї вершини  $X = 0, Y = 5, Z = 28$  (у даному прикладі використовуємо креслення по крапках) і другої вершини  $X = 0, Y = -10, Z = 44$ .

Оскільки скіс має складний характер, використовуйте компонент Line. Виберіть команду Draw  $\rightarrow$  Line або натисніть кнопку на панелі інструментів, наведіть на вікно конструкції, натисніть Tab і введіть координати точок ліній  $X = 0, Y = 5, Z = 28$ , натисніть Enter;  $X = 0, Y = 0, Z = 14,5$ , натисніть Enter;  $X = 0, Y = -5, Z = 28$ , натисніть Enter;  $X = 0, Y = 5, Z = 28$ , натисніть Enter. Далі натисніть праву кнопку миші й виберіть пункт Done. Після виконання даного пункту повинен вийти нерівносторонній трикутник, який примикає до накресленого прямокутника.

По такому ж принципу побудуйте скіс із іншої сторони. Координати точок ліній  $X = 0, Y = 5, Z = 72$ ;  $X = 0, Y = 0, Z = 85,5$ ;  $X = 0, Y = -5, Z = 72$ ;  $X = 0, Y = 5, Z = 72$ .

Виділіть мишею Polyline1, Polyline2 і Rectangle1 у вікні моделі або моделі конструкції, натисніть праву кнопку миші й оберіть Edit  $\rightarrow$  Boolean  $\rightarrow$  Unite. Тепер ці три фрагменти підстави діелектричної пластинки будуть являти собою одне ціле. Для простоти виділення в цьому й інших випадках слід починати з елемента Rectangle. Таким чином, об'єднані елементи будуть мати назва у вікні моделі Rectangle1.

Накресліть верхню частину діелектричної пластини. Для цього накресліть прямокутник з координатами першої точки  $X = 0, Y = 3,5, Z = 27,5$  і другої точки  $X = 0, Y = -7, Z = 45$ . Використовуючи команду Draw  $\rightarrow$  line , накресліть скіс у вигляді трикутника з координатами вершин:  $X = 0, Y = 3,5, Z = 27,5$ ;  $X = 0, Y = 0, Z = 16,5$ ;  $X = 0, Y = -3,5, Z = 27,5$ ;  $X = 0, Y = 3,5, Z = 27,5$ . Використовуючи команду Draw  $\rightarrow$  line , накресліть скіс із іншої сторони у вигляді трикутника з координатами вершин:  $X = 0, Y = 3,5, Z = 72,5$ ;  $X = 0, Y = 0, Z = 83,5$ ;  $X = 0, Y = -3,5, Z = 72,5$ ;  $X = 0$  і закріпіть точкою першої вершини  $Y = 3,5, Z =$

72,5.Об'єднайте елементи Rectangle2 і Polyline3, Polyline4, у першу чергу виділивши Rectangle2.

Накреслите верхню частину феритової пластини. Для цього накресліть прямокутник з координатами першої точки  $X = 0, Y = 1,5, Z = 28$  і координатами другої  $X = 0, Y = -3, Z = 44$ . Накреслите скіс у вигляді трикутника з координатами вершин:  $X = 0, Y = 1,5, Z = 28$ ;  $X = 0, Y = 0, Z = 22$ ;  $X = 0, Y = -1,5, Z = 28$ ;  $X = 0, Y = 1,5, Z = 28$ . Накреслите скіс із іншої сторони у вигляді трикутника з координатами вершин  $X = 0, Y = 1,5, Z = 72$ ;  $X = 0, Y = 0, Z = 78$ ;  $X = 0, Y = -1,5, Z = 72$  і закріпіть точкою першої вершини  $X = 0, Y = 1,5, Z = 72$ . Об'єднаєте елементи Rectangle3, Polyline5 і Polyline6 командою виділивши Rectangle3.

У цьому випадку всі елементи перетинаються. Щоб утворити діелектричну й феритову пластини, виконайте наступні дії:

Задайте площину ZX; виділіть у вікні моделі елемент Rectangle2; скористуйтеся командою Edit → Arrange → Move , з'явиться ромбик, установіть курсор на будь-яку точку осі X. Після того як точка переміщення встановлена, уведіть координати  $X = 0,9, Y = 0, Z = 0$ . Тепер елемент Rectangle2 піднятий над площиною YZ, по осі OX на 0,9мм

Оскільки верхня частина діелектричної пластинки буде також основою феритової пластини і елементи повинні бути окремими один від іншого, ви- діліть елемент Rectangle2 і скопіюйте комбінацією клавіш Ctrl+C, вставте - Ctrl+V. З'явиться елемент Rectangle4, повністю ідентичний елементу Rectangle2, що й перебуває на тому ж самому місці.

Тепер підніміть верхню частину феритового вкладиша. Для цього задайте площину ZX, виділіть елемент Rectangle3, скористайтеся командою Edit → Arrange → Move , установіть курсор на точку осі X, пересуньте елемент Rectangle3 у координату  $X = 4,35; Y = 0; Z = 0$ .

Тепер з'єднаєте елементи Rectangle1 і Rectangle2. Для цього виділіть у вікні моделі Rectangle1 і Rectangle2, клацніть правою кнопкою миші й скористуйтеся

командою Edit → Surface → Connect. Тепер ми маємо елемент, що відіграє роль діелектричної пластинки. Для того щоб створити феритовий елемент, з'єднаєте фігури Rectangle3 і Rectangle4.

Поглинаюча плівка являє собою дуже тонке напилювання товщиною 0,001 мм. Її креслення будемо робити аналогічно попереднім методам. Накресліть прямокутник у площині YZ з координатами першої крапки  $X = 4,35$ ,  $Y = 1,5$ ,  $Z = 28$  і координатами другий  $X = 0$ ,  $Y = -3$ ,  $Z = 44$ .

Задайте хвильові порти на входах лінії.

У якості матеріалу для діелектричної пластинки виберемо ЛК-2. Такого матеріалу немає в стандартній бібліотеці, тому задайте його самі, використовуючи значення Relative Permittivity 2; Dielectric Loss Tangent 0.002.

Для феритового вкладиша поберемо ферит 3СЧ16. Оскільки даного матеріалу немає в стандартній бібліотеці, задайте його характеристики самі.

В HFSS є можливість опису нелінійних властивостей ферита. Знайдіть у списку стандартних матеріалів ferrite, клікніть клавішу View/Edit Materials і змініте параметри.

Коли Ви описуєте феритовий матеріал, потрібно визначити поле зсуву ферита, задаючи джерело підмагнічування (Magnetic Bias Source). Поле зсуву орієнтує магнітні диполі у фериті, створюючи ненульовий магнітний момент. Істотні відмінності мають два варіанти завдання поля зсуву. Перший варіант - однорідне поле зсуву. Цей спосіб завдання поля зсуву не враховує його викривлення, обумовлені неоднорідною структурою аналізованого об'єкта. Другий варіант - облік неоднорідності поля зсуву. Використовуємо перший варіант.

Для визначення поля підмагнічування необхідно виконати наступні операції:

виберіть 3D-феритовий об'єкт, до якого необхідно прикласти магнітний зсув. Клікніть HFSS → Excitations → Assign → Magnetic Bias. З'явиться асистент для створення магнітного зсуву Magnetic. Надрукуйте ім'я джерела в поле Name

або прийміть ім'я за замовчуванням. Визначите спосіб завдання поля зсуву, у нашому випадку однорідне Uniform, натисніть Next. Установите величину Internal Bias у ферите 4000 А/м. Уведіть кути, що задають поворот системи координат пов'язаної з тензором магнітної проникності щодо фіксованої системи координат: X Angle = 90, Y Angle = 0, і Z Angle = 0 (параметрами цих кутів задаємо програмі команду орієнтувати магнітне поле перпендикулярно осі X). Кликніть "Готове".

Для завдання матеріалу поглинаючої плівки виберіть Assign Boundary → Finite Conductivity. У меню, що з'явився, поставте галочку в пункті Use Material. З наведених матеріалів виберіть graphite. Поставте галочку в пункті Layer Thickness і введіть величину 0,001 мм

Для розв'язку використовуємо частоту 10 ГГц.

Маючи розв'язок для структури поля, можна одержати візуальне зображення розподілу поля як по всьому об'єму пристрою, так і на кожній поверхні моделі або в будь-якій заздалегідь визначеній площині. Для прикладу виведіть розподіл поля в площині XZ. Звернетеся до дерева моделі. Розкрийте вузол Planes і виберіть площину XZ у глобальній системі координат, клацнувши лівою кнопкою миші по полю Global:XZ. У вікні 3D-конструктора з'явиться зображення чорного квадрата, розташованого в площині XZ. Правою кнопкою миші викличте контекстне меню й подайте команду Plot Field

→ Mag\_E. Подаючи дану команду, ви повідомляєте HFSS, що необхідно відобразити розподіл амплітуди напруженості електричного поля. У діалоговому вікні, що розкрилося, Create Plot підтвердіть зроблений вами вибір і клацніть кнопку Done.

Після того як установлені параметри розрахунків, можна запустити аналіз отриманого пристрою. Це можна зробити натисканням кнопки Analyze All.

Після аналізу клацнувши в дереві проекту на вузол Fieldoverlays → E\_Field → Mag\_E, прийміть стандартні налаштування, натисніть Done і подивитися розподіл поля у хвилеводі. Також можна візуально розглянути

проходження хвиль у русі, клацнувши правою кнопкою миші по Mag\_E і нажавши Animate→ok.

У цьому випадку збуджується порт P1. Щоб збуджувався порт 2, а порт 1 залишався пасивним, клацніть правою кнопкою миші на вузол Fieldoverlays, виберіть Editsources, поміняйте параметр Scalingfactor у рядку P1:1 на 0, а в рядку P2:1 на 1, натисніть ОК. Клацніть правою кнопкою миші на вузол E Field, виберіть Updateplots. Тепер хвилі йдуть із порту P2 у порт P1.

Для виводу результатів у вигляді таблиці зробіть наступне.

Клацніть правою кнопкою миші на вузол Results. Виберіть у контекстному меню Create Modal Solution Data Report → Data Table. Перевірте, що в поле Solution коштує Setup1>Lastadaptive. У поле Category виберіть S Parameter. Затисніть клавішу Shift і в поле Quantity виберіть S(P1, P1), S(P1, P2), S(P2, P1), S(P2, P2). У поле Function поставте db. Натисніть кнопку New Report.

Тепер ми бачимо дані про коефіцієнти передачі на частоті 10 ГГц. Якщо все зроблене правильно, то отримані дані говорять про недостатнє вентиляне відношення.

Для того щоб подивитися область частот, на яких дана конструкція може працювати краще, слід провести аналіз у смузі частот від 8 до 11 ГГц із кроком 0,5 ГГц. Тепер можна намалювати частотні залежності вищезазначених S-параметрів. По них визначити частоту, на якій забезпечується найкраще вентиляне відношення і його величину. Також вивчити анімовані картини поля хвиль, що біжать у прямому й зворотному напрямках.

Для того щоб подивитися область частот, на яких дана конструкція може працювати краще, слід провести аналіз у смузі частот від 8 до 11 ГГц із кроком 0,5 ГГц. Тепер можна намалювати частотні залежності вищезазначених S-параметрів. По них визначити частоту, на якій забезпечується найкраще вентиляне відношення і його величину. Також вивчити анімовані картини поля хвиль, що біжать у прямому й зворотному напрямках.

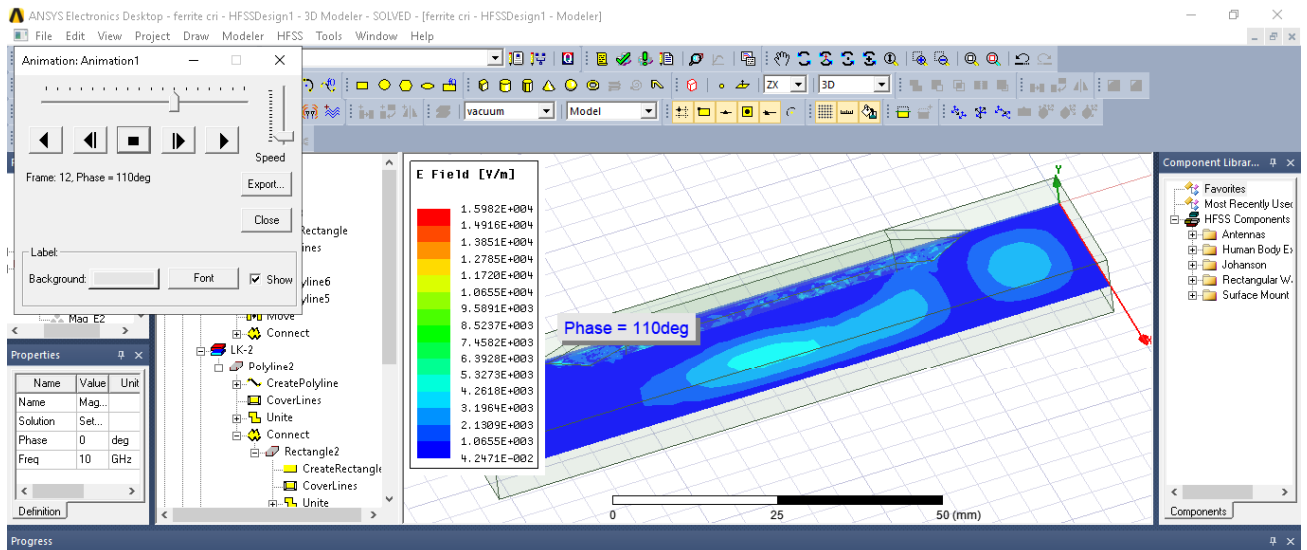


Рисунок 2.8 – Розподіл поля в феритовому вентилі при проходженні хвилі в прямому напрямку

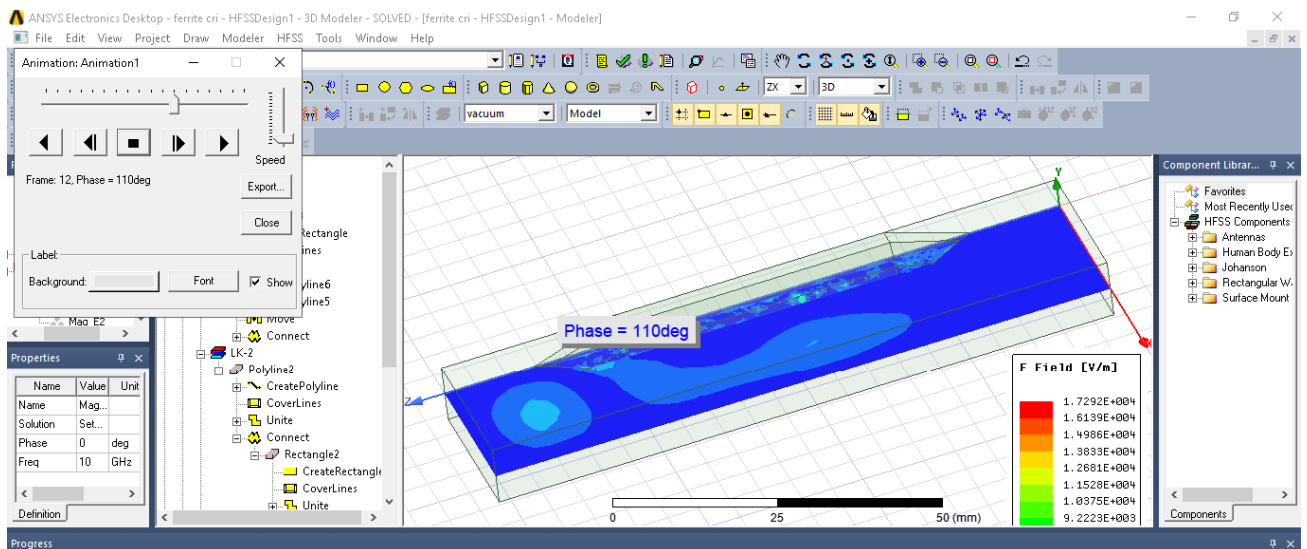


Рисунок 2.9 – Розподіл поля у феритовому вентилі при проходженні хвилі у зворотному напрямку

§

Феритовий вентиль невзаємний пристрій має різний розподіл поля в прямому і зворотному напрямку



Рисунок 2.10 – Поведінка S параметрів в діапазоні частот

На рисунках 2.8, 2.9 показано розподіл поля в вентилі при проходженні падаючої і відбитої хвилі в вентилі при наявності в хвилеводі феритової пластини.

На рис.2.10 показано коефіцієнти матриці розсіювання. Аналіз рис.2.10 показує різні коефіцієнти передачі в прямому та зворотному напрямках.

### 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ, ВИБІР ОСНАЩЕННЯ, НЕОБХІДНОГО ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ УСТАНОВОК

Лабораторна установка складається з вимірювача КСХН панорамного Р2-65, феритового вентиля (рис 3.1), і комплекта НВЧ- вузлів[3, 11].

До складу приладу входять наступні основні блоки й вузли:

- індикатор КСХН й ослаблення (далі « індикатор»);
- генератор хитної частоти (ГХЧ);
- вимірювальні НВЧ-вузли.

Панорамний вимірювач працює наступним чином. Сигнал від генератора ГХЧ через регульований атенюатор, основні канали напрямлених відгалужувачів падаючої і відбитої хвилі надходить до досліджуваного пристрою.

На виходах вторинних каналів напрямлених відгалужувачів з'являються сигнали пропорційні падаючій і відбитій хвилям, обидва сигнали надходять до вимірювача відношень у складі блока індикатора Я2Р-67, де розраховується сигнал, пропорційний квадрату модуля коефіцієнта відбиття. Цей сигнал проходить на пластини вертикального відхилення електронно-променевої трубки у складі блока індикатора Я2Р-67. Для формування напруги розгортки від генератора хитної частоти поступає сигнал перестройки частоти. Також у склад генератора хитної частоти входить хвилемір, який вимірює частоту. З метою калібрування осі частот сигнал хвилемір після звуження подається на модулятор електронно-променевої трубки для підсвічування екрана в момент збігу частоти настройки хвилеміра і частоти генератора.

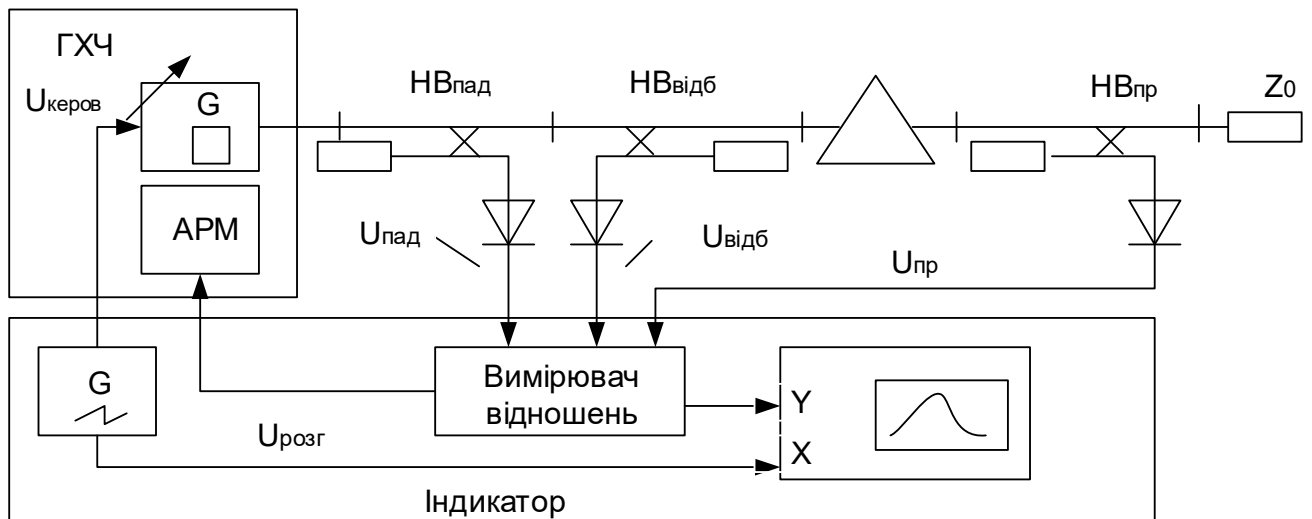


Рисунок 3.1 – Структурна схема панорамного вимірювача КСХН

#### Порядок виконання роботи

##### При підготовці установки до роботи:

зібрати схему вимірювання КСХН (рис.3.1), перевірити щільність фланцевих з'єднань, увімкнути прилад до мережі й підготувати його до роботи;

##### Проведення вимірювань:

–зробити калібрування фіксованим короткозамикачем (виключити вентиль з тракту).

–приєднати досліджуваний вентиль виходом 1 перед навантаженням, виміряти залежність КСХН вентилля від частоти.

##### Проводити вимірювання КСХН об'єкта в наступному порядку:

– поставити перемикач МЕЖІ в положення, при якому крива КСХН розташовується на екрані зручно для спостереження й вимірювання (поблизу середини екрана) ;

– установити за допомогою ручки ЧАСТОТА ГХЧ візир частотоміра на оцінку, що відповідає частоті вимірювання;

- отримати збіг обертаючи ручку ВІДЛК (на блоці індикації) , лінію електронного візира із кривою КСХН у місці знаходження частотної мітки. Амплітуду мітки при необхідності регулюйте ручкою МІТКА (індикатор);
- відрахувати вимірюване значення КСХН по шкалі КСХН (нижня шкала шкального пристрою);
- вимкнути генератор, приєднати досліджуваний вентиль виходом 2, увімкнути генератор, виміряти залежність КСХН вентилля від частоти;
- побудувати графіки залежності КСХН виходів вентилля від частоти, зробити висновок про втрати в кожному напрямку.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз умов праці

Розробка і виконання дипломної роботи проводиться в приміщенні науково-дослідної лабораторії (НДЛ), яка розташована на 1 поверсі 4 поверхового будинку, несучі стіни і перегородки якого цегляні, а перекриття - залізобетонні конструкції. Розміри приміщення комп'ютерного залу складають 7х5х4 м, що становить площа 35 м<sup>2</sup>, обсяг 140 м<sup>3</sup>. У приміщенні 2 вікна площею 10 м<sup>2</sup>. Кількість працюючих - 3 програміста. На кожному робочому місці знаходиться сучасний комп'ютер (монітор і системний блок). Споживана потужність електрообладнання 3 кВт.

Приміщення відповідає вимогам: - на одне робоче місце припадає 11,6 м<sup>2</sup>, обсяг - 46,6 м<sup>3</sup> при нормі 6 м<sup>2</sup> і 20 м<sup>3</sup> відповідно по НПАОП 0.00-1.28-10.

Електроживлення здійснюється за допомогою трифазної чотирьох мережі з глухозаземленою нейтраллю напругою 380/220 В частотою 50 Гц.

Лінія електромережі для живлення ПЕОМ виконана як окрема трипровідна мережа, шляхом прокладання фазного, нульового робочого та нульового захисного провідників. Необхідно проводити контроль ізоляції. Контроль проводити між нулем і фазою і між фазами. Опір ізоляції має бути не менше 500 кОм. Контроль проводити не рідше 1 разу на рік при відключеному електроживленні.

Проводиться вступний інструктаж для нових працівників, первинний інструктаж на робочому місці (безпечні прийоми праці, конкретна виробнича обстановка), повторний інструктаж один раз в півріччя, позаплановий інструктаж при введенні в дію нових стандартів, правил; при зміні технологічного процесу, нещасних випадках, цільовий інструктаж.

Проведення всіх інструктажів реєструється у відповідних журналах інструктажу з обов'язковим підписом інструктували та особи, яка інструктує.

Журнали інструктажів повинні бути пронумеровані, прошнуровані та скріплені печаткою. При виконанні робіт, не пов'язаних з основною діяльністю, необхідно проводити цільовий інструктаж.

#### 4.2 Виробнича санітарія в НДЛ

Приміщення має природне і штучне освітлення. Зорова робота проєктувальника є роботою високої точності (найменший розмір об'єкта розрізнення 0,3-0,5 мм). Тоді розряд зорової роботи - III "В". За вимогами ДБН В.2.5-28-2006 величина коефіцієнта природного освітлення (КПО) повинна бути  $\geq 1,2\%$ ,  $E_{min} = 200$ лк. Вікна мають регульовальні пристрої для відкриття, жалюзі.

Робота відноситься до категорії легкої 1а і, згідно з ДСН 3.3.6-042-99 «санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», оптимальні параметри мікроклімату повинні відповідати таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Оптимальні параметри мікроклімату

Пора року	Температура повітря, град. С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодна	22–24	40–60	$\leq 0,1$
Тепла	23–25	40–60	$\leq 0,1$

Допустимі рівні звукового тиску і рівні шуму на робочому місці повинні відповідати ДСН 3.3.6-037-99 «санітарні норми шуму, інфразвуку та ультразвуку». Еквівалентний рівень звуку не перевищує 50 дБ.

Робочі місця розташовані щодо світлових прорізів так, щоб природне світло падало зліва. Організація кожного робочого місця забезпечує відповідність усіх елементів робочого місця та їх розташування ергономічним вимогам НПАОП 0.00-1.28-10. Висота робочої поверхні столу для ПЕОМ - 750 мм, ширина столу - 1000 мм, глибина столу - 800 мм. Робочий стіл має простір для ніг висотою не менше 600 мм і шириною не менше 500 мм.



У приміщенні НДЛ параметри мікроклімату не відповідають нормам. Для забезпечення встановлених норм мікроклімату слід застосовувати кондиціонування. Виконаємо розрахунок кондиціонування.

Джерелами надлишкового тепла в приміщенні є люди, устаткування, штучне освітлення, сонячна радіація, тепло, яке передається через стіни.

Визначаємо кількість тепла, що виділяється працюючими:

$$Q_p = 0,5 \cdot n \cdot q, \quad (4.1)$$

де  $n$  – кількість працюючих в приміщенні,  $n = 3$ ;

$q$  – кількість тепла, що виділяється робочим за 1 годину,  $q = 120$  ккал/ч (для категорії рабiт I а);

$$Q_p = 0.5 \cdot 3 \cdot 120 = 180 \text{ ккал/ч}$$

Визначаємо кількість тепла, що виділяється обладнанням:

$$Q_{\text{обор.}} = 860 \cdot N \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2, \quad (4.2)$$

де  $\varphi_1$  – коефіцієнт використання настановної потужності устаткування;

$$\varphi_1 = 0,85 \text{ (} 0,85 \div 0,9 \text{)};$$

$\varphi_2$  – коефіцієнт одночасності роботи устаткування в зміні,  $\varphi_2 = 1$  ( $0,5 \div 1$ );

$N$  – потужність обладнання (кВт),  $N = 3$  кВт;

$$Q_{\text{обор.}} = 860 \cdot 3 \cdot 0,85 \cdot 1 = 2193 \text{ ккал/ч}$$

Визначаємо кількість тепла від джерела освітлення

$$Q_{\text{осв.}} = K \cdot E \cdot S, \quad (4.3)$$

де  $K$  – питоме тепловиділення на 1 люкс освітленості,  $K = 0,05$  ккал/лк·м<sup>2</sup>·ч  
 $E$  – найменша освітленість приміщення, 300 лк;  
 $S$  – площа приміщення,  $S = 7 \cdot 5 = 35$  м<sup>2</sup>.

$$Q_{\text{осв.}} = 0,05 \cdot 300 \cdot 35 = 525 \text{ ккал/ч}$$

Визначаємо кількість тепла, що надходить через вікна:

$$Q_{\text{солн.}} = s \cdot q \cdot k \cdot k_c, \quad (4.4)$$

де  $s$  – площа скління,  $s = 10$  м<sup>2</sup>;

$q$  - величина сонячної радіації, що передається через 1 м<sup>2</sup> скління, що залежить від орієнтування вікон,  $q = 130$  ккал / м<sup>2</sup> · год (вікна спрямовані на північний схід);

$k$  - коефіцієнт, що залежить від місця розташування,  $k = 1,15$ ;

$k_c$  - коефіцієнт затінення,  $k_c = 0,8$ .

$$Q_{\text{солн.}} = 10 \cdot 130 \cdot 1,15 \cdot 0,8 = 1196 \text{ ккал/ч}$$

Кількість тепла, що надходить в приміщення через стіни  $Q_{\text{ст.}}$ , Прийmemo рівним нулю, тому що стіни цегляні.

Визначимо сумарну кількість тепла

$$Q_{\Sigma} = Q_p + Q_r + Q_{\text{обор.}} + Q_{\text{осв.}} + Q_{\text{солн.}} + Q_{\text{ст}} \quad (4.5)$$

Таким чином можемо визначити

$$Q_{\Sigma} = 180 + 2193 + 525 + 1196 + 0 = 4094 \text{ ккал/ч}$$

Визначаємо необхідний повітрообмін приміщення:

$$L = \frac{Q_{\Sigma}}{C(t_{\text{н}} - t_{\text{пр.}})}, \quad (4.6)$$

де  $C = C_{\text{уд.}} \cdot P_{\text{об}}$  - об'ємна теплоємність сухого повітря;

$t_{\text{н}}$  - температура повітря, що видаляється,  $t_{\text{н}} = 31^{\circ} \text{C}$ ;

$t_{\text{пр.}}$  - припливна температура,  $t_{\text{пр.}} = 21^{\circ} \text{C}$ ;

$C_{\text{уд.}}$  - питома теплоємність повітря,  $C_{\text{уд.}} = 0.237 \text{ ккал / кг }^{\circ} \text{C}$ ;

$P_{\text{об}}$  - об'ємна вага припливного повітря,  $P_{\text{об}} = 1,205 \text{ кг / м}^3$ ;

$$C = 0,237 \cdot 1,205 = 0,286 \text{ ккал/м}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$L = \frac{4094}{0,286(31 - 21)} = 1101,12 \text{ м}^3 / \text{ч}$$

Визначаємо необхідну продуктивність кондиціонера на охолодження

$$Q_{\text{хол.}} = L \cdot C (t_{\text{нар.}} - t_{\text{пр.}}), \quad (4.7)$$

де  $t_{\text{нар.}}$  - зовнішня температура повітря,  $t_{\text{нар.}} = 32^{\circ} \text{C}$ .

$$Q_{\text{хол.}} = 1101,12 \cdot 0,286(32 - 21) = 4093,96 \text{ ккал/ч}$$

Система кондиціонування вибирається виходячи з таких умов:

$$L_k \geq L \quad \left\{ \begin{array}{l} Q_k \geq Q_{\text{хол.}} \end{array} \right. , \quad (4.8)$$

де  $L_k, Q_k$  – продуктивність кондиціонера за обсягом і холоду відповідно.

З урахуванням отриманих результатів вибираємо кондиціонер Daewoo DMB-1812LN, який зможе забезпечити для спекотної пори необхідні повітрообмін і охолодження зовнішнього повітря для підтримки оптимальних параметрів мікроклімату. Характеристики: Обмін повітря – 1200 м<sup>3</sup>/год; продуктивність на охолодження - 5,8 кВт, рівень шуму - 32дБ.

#### 4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Для забезпечення безпеки людей при роботі з комп'ютером в приміщенні слід дотримуватися загальні вимоги пожежної безпеки згідно з ГОСТ 12.1.004-91. Причиною пожежі в приміщенні, можуть бути: коротке замикання електропроводки; несправність ПЕОМ та іншого електрообладнання.

Відповідно до вимог ГОСТ 12.1.004-91 приміщення комп'ютерного відділу оснащено:

- димовими пожежними сповіщувачами в кількості 1 датчик (контролює площу до 86 м<sup>2</sup> по ДБН В.2.5-56-2010);
- вуглекислотними переносними вогнегасниками в кількості 2 штуки (з розрахунку 1 вогнегасник на 3 ПК, але не менше 2 на приміщення), об'ємом 2 л, ВВК-1,4;
- кошма.

При проектуванні і будівництві виробничих і допоміжних будівель промислових підприємств передбачають евакуаційні виходи, призначені для безпечної евакуації знаходяться в будівлі в разі виникнення пожежі або аварії. Ефективність евакуації досягається створенням шляхів евакуації. На евакуаційних шляхах організовано природне і штучне аварійне освітлення.

## ВИСНОВКИ

Отримані результати частково збігаються із загальновідомими, вперше отримано гармонізовано формули втрат резонансного феритового вентиля, проведені дослідження дозволили спростувати гіпотезу про те, що добуток косинусів і синусів у формулі втрат феритовий вентиль – частотна характеристика, виникає в результаті тригонометричних і арифметичних перетворень. Для врахування частотного діапазону використовується те, що на середній частоті присутній кругова поляризація, на крайній – діапазоні також буде кругова поляризація, тільки площа кругової поляризації зміститься порівняно з положенням площини кругової поляризації на середній частоті. Тобто виходить своєрідна система двох рівнянь щодо двох положень площини поляризації відносно широкої сторони перерізу прямокутного хвилеводу.

Наукова новизна полягає в систематизації та узагальненні формул втрат резонансу феритового вентиля, доведено зв'язок між формулами з різних літературних джерел, як зарубіжних, так і вітчизняних, що є економією часу дослідників феритових вентилів. для перевірки формули.

Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що їх можна використовувати для навчання та оптимізації конструкції феритового вентиля.

Перспективою є вивчення поведінки феритової пластини на модах поширення вищого порядку та, нарешті, розробка моделі фізичного моделювання для резонансного феритового вентиля в ANSYS/HFSS.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3008 – 2015. Державний стандарт України. Документація, звіти у сфері науки. Структура і правила оформлення – Чинний від 1 липня 2017 р.
2. Чернушенко А.М., Петров Б.В., Малорацкий Л.Г. и др.. Конструирование экранов и СВЧ устройств. Ученик для вузов, – М.: Радио и связь, – 1990.– 336 с.
3. Расчет и измерение характеристик устройств СВЧ и антенн : учеб. пособие / Ю. Е. Мительман, Р. Р. Абдуллин, С. Г. Сычугов, С. Н. Шабунин ; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. Ю. Е. Мительмана. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 140 с.
4. Вамберский М. В. Конструирование феритовых развязывающих устройств СВЧ / М. В. Вамберский, В. П. Абрамов, В. И. Казанцев. – М. : Радио и связь, 1982. – 136 с.
5. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Конструювання пристроїв НВЧ», 2011. – 32 с.
6. Микаэлян А. Л. Теория и применение феритов на сверхвысоких частотах / А. Л. Микаэлян. – М. Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 664.
7. Лакс Б. Сверхвысокочастотные фериты и ферритмагнетики / Б. Лакс, К. Баттон ; пер. с англ. под ред. А. Г. Гуревича. – М. : Мир, 1965. – 676 с.
8. Microwave Physics and Techniques Lecture 14 Ferrite Materials [Електронний ресурс]. – 2003. – Режим доступу до ресурсу: [antenna.fe.uni-lj.si/literatura/VajeVT/Cirkulator/stara/Lecture14.pdf](http://antenna.fe.uni-lj.si/literatura/VajeVT/Cirkulator/stara/Lecture14.pdf)
9. Zaichenko, O. B., Zaichenko, N. Y.. Systematization of the Formulas of the Resonance Ferrite Isolator Loss.Радіоелектроніка, інформатика, управління, 2022, 1. – С.20-29.
10. Мительман Ю.Е. Автоматизированное проектирование микроволновых устройств в HFSS. Учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. — 60 с.