

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет електроніки та інформаційних технологій

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

_____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 153 – «Мікро- та наносистемна техніка»

(код та назва)

освітньо-наукової програми Нанотехнології та біомедичні системи

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

(назва програми)

на тему «Чисельне моделювання S – параметрів електродинамічної системи екранованого спрямованого відгалужувача із розподіленням зворотнім зв'язком»

Здобувача групи ФЕ.м-21 Сердитова Андрія Сергійовича

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Андрій СЕРДИТОВ

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник доцент каф. КСУ, канд. фіз.-мат. наук Олександр КРИВЕЦЬ _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Суми – 2023

Сумський Державний Університет

(назва вузу)

Факультет ЕлІТ Кафедра комп'ютеризованих систем управління

Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. Кафедрою _____

« » _____ 20 р.

ЗАВДАННЯ

НА магістерську РОБОТУ СТУДЕНТОВІ
магістерську/ бакалаврську

Сердитова Андрія Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Чисельне моделювання S – параметрів електродинамічної системи екранованого спрямованого відгалужувача із розподіленним зворотнім зв'язком

затверджені наказом по університету від “15” грудня 2023 року №1462-VI.

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) 20.12.2023 р.

3. Вхідні дані до проекту (роботи) Теоретична модель екранованого спрямованого відгалужувача із розподіленним зворотнім зв'язком, метод FDTD.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) Провести аналіз і класифікація НВЧ спрямованих відгалужувачів по типу взаємного зв'язку, що використовується. Використовуючи програмний продукт CST – studio створити 3D моделі досліджуваних систем, провести чисельне моделювання їх електродинамічних параметрів. Надати фізичну трактовку отриманих результатів.

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

Презентація із наведеними результатами проведеного аналізу, що складається із 16 змістовних слайдів (титульний слайд , актуальність роботи, досліджувані теоретичні моделі і їх електродинамічні характеристики, метод FDTD дисперсійне рівняння, спрощене рівняння, графіки.

6. Дата видачі завдання: 16.11.2023 р.

Керівник

(підпис)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження магістерської роботи є чисельне моделювання близько розташованих діелектричних хвилеводів із провідним екраном, що є аналогом спрямованого відгалужувача.

Мета даної роботи полягає у пошуку нових механізмів керування на вихідні характеристики досліджуваної моделі.

Робота складається зі вступу, аналітичного огляду по спрямованим відгалужувачам, методиці їх чисельного моделювання, основної частини по дослідженню теоретичної електродинамічної моделі і результатів чисельного моделювання, питань ТБ та висновків.

Обсяг роботи 68 сторінок , 26 рисунка, 29 формули, 29 літературних джерела.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СПРЯМОВАНИЙ ВІДГАЛУЖУВАЧ, ХВИЛЕВІД,
МАТРИЦЯ РОЗСІЮВАННЯ, МЕТОД КІНЦЕВИХ РІЗНИЦЬ,
S - ПАРАМЕТРИ, АНАЛІЗ ЧОТИРИПОЛЮСНИКІВ.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 8 |
| РОЗДІЛ 1.ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИСТРОЇ НА БАЗІ ПОВ'ЯЗАНИХ ХВИЛЕПРОВІДНИХ СИСТЕМ | 9 |
| 1.1 Основні характеристики спрямованих відгалужувачів..... | 10 |
| 1.2 Двошарова планарна лінза Люнеберга. | 12 |
| 1.3 Смужкові спрямовані відгалужувачі..... | 15 |
| 1.4 Спрямовані відгалужувачі на дзеркальних діелектричних хвилеводах | 19 |
| 1.5 Спрямовані відгалужувачі на діелектричних хвилеводах і щілинних лініях передачі | 20 |
| 1.6 Хвилеводно-пучкові перетворювачі на багатозв'язних діелектричних хвилеводах..... | 22 |
| 1.7 Спрямований відгалужувач на базі двох зв'язаних діелектричних хвилеводів | 25 |
| РОЗДІЛ 2.ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКРАНОВАНИХ РОЗПОДІЛЕНО- ЗВ'ЯЗАНИХ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ | 27 |
| 2.1 Метод кінцевих різниць..... | 28 |
| 2.2 Матриця розсіювання, S-параметри, аналіз чотирьополіусників | 30 |
| РОЗДІЛ 3.ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПІД ЧАС НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ | 51 |
| 3.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час роботи на ноутбучі | 52 |
| 3.2 Аналіз природного та штучного освітлення..... | 54 |
| 3.3 Класифікація приміщень за вибухопожежною та пожежною безпекою | 61 |
| ВИСНОВОК..... | 64 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

НВЧ - надвисокі частоти;

СВ - спрямований відгалужувач;

ДХ - діелектричний хвилевід;

КСХ - коефіцієнт стоячої хвилі;

ХПП - хвилеводно-пучкові перетворювачі;

ПЛХ - планарний хвилевід;

ЕДП - ефективна діелектрична проникність;

ЛКЗ - лінійний коефіцієнт зв'язку;

БЗДХ - багатозв'язні діелектричні хвилеводи;

КПО - коефіцієнт природної освітленості.

ВСТУП

Розвиток елементної бази НВЧ діапазону є актуальною задачею, бо НВЧ технології знаходять застосування у все більшому числі напрямків. Серед них біомедична інженерія, мікро та нанотехнології, енергетика, модифікація матеріалів, тощо. Важливу роль відіграють спрямовані відгалуджувачі (СВ), модифікації яких реалізуються у все більшій кількості пристроїв $\sim 1-10^4$, які переважно базуються на зв'язаних хвилеводних системах.

Тип взаємного зв'язку разом із типом хвилеводів визначають певною мірою діапазон використання і конструкцію пристрою. Керування такими пристроями, в основному реалізується впливом на взаємний зв'язок систем спрямування хвиль. Саме цій проблемі присвячена ця робота.

Метою роботи є пошук нових способів керування хвильовими процесами, таких як вплив на умови розповсюдження мод близьким розташуванням провідних об'єктів різних геометричних параметрів, що має суттєво розширити можливості СВ.

РОЗДІЛ 1

ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИСТРОЇ НА БАЗІ ПОВ'ЯЗАНИХ ХВИЛЕПРОВІДНИХ СИСТЕМ

Функціональні пристрої, які використовують зв'язані діелектричні хвилеводи, знайшли широке застосування у різноманітних сферах, як самостійні пристрої або складові частини радіоелектронної апаратури. Серед таких пристроїв варто виділити СВ, хвилеводно-пучкові перетворювачі на багатозв'язних діелектричних хвилеводах, елементи сумарно-різницевих перетворювачів для приймання багатоімпульсних сигналів та системи, що базуються на планарних лінзах Люнеберга і багато іншого [10].

Спільним для таких систем є реалізація одного з типів зв'язку між ДХ: розподіленого, локального, радіаційного або дифракційного.

Розподілений тип зв'язку між двома ДХ має низку суттєвих переваг [11]:

- можливість плавної зміни зазору шляхом вигину або непаралельного розташування ДХ;
- плавний закон зміни зазору між ДХ по довжині сприяє високій спрямованості та малим коефіцієнтам стоячої хвилі (КСХ) з боку всіх плечей СВ;
- менш жорсткі допуски на різні зв'язки.

Але незважаючи на переваги, основним недоліком цього типу зв'язку є недостатній частотний діапазон за перехідним ослабленням і посилення вимог за розмірами зв'язку та узгодженням із зовнішнім трактом під час просування в субміліметровий діапазон довжин хвиль. Спробі часткового вирішення цих проблем і присвячена робота.

1.1 Основні характеристики спрямованих відгалужувачів

Спрямований відгалужувач - пристрій для відгалуження частини електромагнітної енергії з основного каналу передачі в допоміжний.

Загальний принцип побудови СВ ґрунтується на використанні двох пов'язаних між собою ліній передавання енергії, однією з яких проходить основний потік потужності, а в допоміжній лінії - інтерференція і поділ прямих і зворотних хвиль.

СВ призначені для відгалуження або підсумовування частини потужності, що поширюється в певному напрямку хвилеводом. Вони використовуються для вимірювання прохідної та відбитої потужності в тракці, а також для її ослаблення під час реєстрації великих рівнів потужності [12].

Наразі у вимірювальних схемах міліметрового і субміліметрового діапазонів хвиль залежно від вимог, що висуваються, використовується велика кількість модифікацій СВ.

Найбільш близькими до описаних СВ є системи, побудовані на ДХ або діелектричних планарних хвилеводах.

На міліметрових і коротших хвилях СВ з відрізків металевих хвилеводів застосовувати неефективно через вузьку смугу пропускання; замість них зручно використовувати СВ, утворені двома відрізками ДХ, плавно зведених на деяку відстань [13].

СВ широко використовуються у різних галузях радіоелектроніки, як самостійні пристрої в хвилеводних і кабельних лініях, так і як елементи радіоелектронної апаратури. Як самостійні пристрої, СВ використовуються для розгалуження сигналу з лінії (наприклад, телевізійні розгалужувачі) і для контролю параметрів сигналу в лінії та її узгодження. Як елементи апаратури СВ застосовується в основному в радіовимірювальних приладах - НВЧ ватметрах, приладах для вимірювання КСХ, коефіцієнта передавання, установках для

перевірки атенуаторів і вимірювання послаблень; як хвилевідно-пучкові перетворювачі (ХПП) на багатозв'язаних ДХ, а також в інших випадках.

Основні характеристики СВ [14]:

- перехідне згасання або ослаблення C - відношення потужності сигналів, що поширюються в основному і допоміжному трактах у заданому напрямі хвилі, що біжить в основному тракті:

$$C = 10 \lg P_1/P_4; \quad (1.1)$$

- спрямованість відгалужувача N - відношення потужностей у допоміжному тракті за прямого і зворотного напрямків поширення сигналу (може бути позитивною - пряма спрямованість і негативною - зворотна):

$$N = 10 \lg P_4/P_3; \quad (1.2)$$

- баланс вихідних плечей B :

$$B = 10 \lg P_2/P_4; \quad (1.3)$$

- ізоляція J :

$$J = 10 \lg P_1/P_3; \quad J = N + C. \quad (1.4)$$

Параметри СВ пов'язані з елементами матриці розсіювання:

$$N = 20 \lg |S_{14}|/|S_{13}|; \quad C = 20 \lg 1/|S_{14}|; \quad B = 20 \lg |S_{12}|/|S_{14}|;$$

$$КСХВ_{осн} = (1 + |S_{11}|)/(1 - S_{11}); КСХВ_{допоміж} = (1 + |S_{22}|)/(1 - S_{22}).$$

Додаткові характеристики СВ [14]:

- коефіцієнт вибіркості - для багатомодових хвилеводів вибіркових СВ, у тому числі і призматичних (визначається відношенням коефіцієнтів зв'язку необхідних типів хвиль);
- смуга робочих частот СВ - визначається заданими межами мінімальної спрямованості і перепадом перехідного ослаблення;
- вхідний КСХВ;
- внесені втрати або згасання (може характеризуватися омичними, поляризаційними і радіаційними втратами).

1.2 Двошарова планарна лінза Люнеберга

Інтерес до лінз Люнеберга [7] зумовлений проблемами технічного освоєння міліметрового і субміліметрового діапазонів, у яких хвилевідний принцип просторового опрацювання полів, що знайшов застосування в нижчих діапазонах, поступається місцем квазіоптичним принципам, в котрих лінзи і дзеркала відіграють визначальну роль.

Розглянемо лінзу, що складається з двох планарних хвилеводів (ПЛХ). Вони можуть мати різну конструкцію, наприклад, їх можна виконати у вигляді плоских хвилеводів, планарних діелектричних хвилеводів тощо. Тоді їхня ефективна діелектрична проникність змінюється від центру лінзи до її твірної за законом, що забезпечує перетворення циліндричної хвилі опромінювача в плоску хвилю на виході лінзи [15].

На рис. 1.1 зображено структурну схему двошарової лінзи Люнеберга.

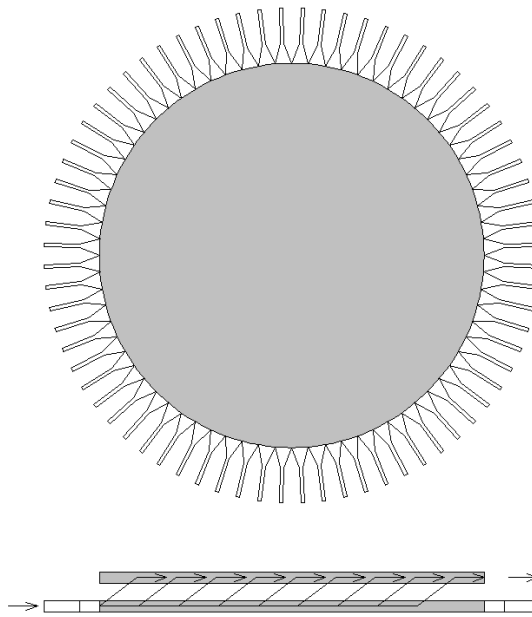


Рис. 1.1. Структурна схема двошарової лінзи Люнеберга [15]

Також істотним фактором слугує розподілений зв'язок ПЛХ. Завдяки цьому зв'язку хвиля в міру поширення вздовж нижнього шару поступово переходить на верхній шар вільний від опромінювачів. Для проектування такої лінзи важливо визначити не тільки закон зміни ефективної діелектричної проникності (ЕДП) ПЛХ, а й закон розподілу лінійного коефіцієнта зв'язку (ЛКЗ) між ПЛХ. До вибору ЛКЗ висувається вимога повного перекачування потужності хвилі, сформованої опромінювачем, на верхній шар лінзи. Випромінювання у вільний простір відбувається з верхнього шару, минаючи опромінювачі. Таким чином, негативний вплив ефекту затінення усувається.

Розглянемо лінзу з однаковими ПЛХ [15]. Завдяки цьому структура має площину симетрії. З теорії зв'язаних хвиль випливає [16], що в симетричній структурі можуть поширюватися дві основні хвилі, які заведено називати парною і непарною. Парна хвиля відповідає розміщенню в площині симетрії магнітної, а непарна хвиля електричної стінки. Ці хвилі мають різні постійні поширення γ_c і γ_n . Через них визначається згадуваний ЛКЗ S :

$$C = \frac{\gamma_c - \gamma_n}{2} \quad (1.5)$$

Особливістю двошарової лінзи є те, що вона описується двома ЕДП ε_{ec} і ε_{en} , які пов'язані з постійними γ_c і γ_n :

$$\varepsilon_{ec} = \left(\frac{\gamma_c}{k}\right)^2, \quad \varepsilon_{en} = \left(\frac{\gamma_n}{k}\right)^2 \quad (1.6)$$

де k - хвильове число вільного простору.

У загальному випадку завдання синтезу двошарової лінзи Люнеберга полягає у визначенні двох функцій $\varepsilon_{ec,n}(r)$, виходячи зі сформульованих вище вимог.

Ми спростимо завдання, припускаючи, що ЛКЗ є малим параметром:

$$\frac{C}{\gamma_{c,n}} \ll 1 \quad (1.7)$$

У цьому разі можна припустити, що шукані розподіли ЕДП для парної і непарної хвиль близькі до відомого рішення для одношарової лінзи [17]:

$$\varepsilon_{ec,n} = \varepsilon_{c,n0} \left(2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \right) \quad (1.8)$$

де $\varepsilon_{c,n0}$ - параметри, котрі необхідні визначити нижче,

R - радіус лінзи.

З формули видно, що прийняті закони зміни ЕДП забезпечують ідеальне Фокусування як парних так і не парних хвиль, сформованих точковим джерелом при умові, що зовнішнє середовище для парних хвиль має ЕДП рівну ϵ_{c0} , а для непарних ϵ_{n0} . У цей час, з практичної точки зору зовнішнє середовище повинна мати проникність рівну одиниці, оскільки завданням лінзи є випромінювання у вільний простір. Відмінність $\epsilon_{c,n0}$ від одиниці є джерелом фазових спотворень розподілу поля у вихідній площині.

Зі співвідношень (1.8) видно, що ЛКЗ у наближенні задано такою функцією:

$$C(r) = \frac{\sqrt{\epsilon_{c0}} - \sqrt{\epsilon_{n0}}}{2} k \left(2 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (1.9)$$

Таким чином, для задоволення вимог до фазового розподілу і втрат потужності маємо два вільні параметри $\epsilon_{c,n0}$.

1.3 Смушкові спрямовані відгалужувачі

Смушкові СВ можна класифікувати таким чином:

- за видом зв'язку між основним і додатковим каналом смугові спрямовані відгалужувачі поділяють на три типи: з розподіленим електромагнітним зв'язком; зі зв'язком шлейфового каналу; з ємнісним зв'язком.
- за ступенем зв'язку смугові спрямовані відгалужувачі поділяються на два типи: із сильним зв'язком (менше 10 дБ); зі слабким зв'язком (більше 10 дБ).

- залежно від типу використовуваних смужкових хвильоводів спрямовані відгалужувачі бувають симетричні та несиметричні.

За видом діелектрика, використовуваного в смужковому хвильоводі, розрізняють спрямовані відгалужувачі з повітряним і твердим заповнювачем, а також мікросмужкові спрямовані відгалужувачі, виготовлені на основі методів НВЧ друку з великим значенням відносної діелектричної проникності підкладки [18].

Смужкові спрямовані відгалужувачі з розподіленим електромагнітним зв'язком (рис. 1.2) представляють собою паралельно розташовані й електромагнітно пов'язані смужкові хвильоводи з хвилею типу TEM. Відгалужена в додатковий смужковий хвильовід потужність поширюється в напрямку, зворотному напрямку поширення її в основному хвильоводі. Такі відгалужувачі носять назву "протиспрямованих".

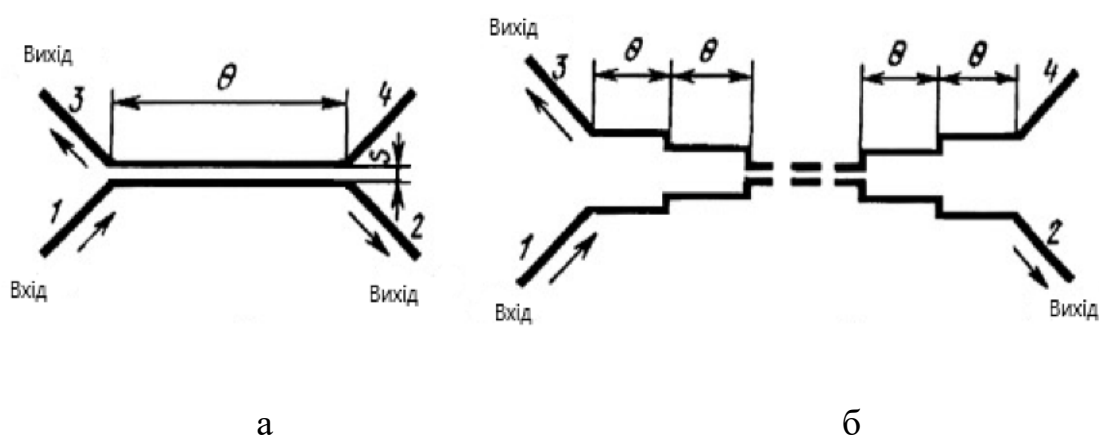


Рис. 1.2. Одноланковий спрямований відгалужувач з електромагнітним зв'язком (а) та багатоланковий (б) [18].

Залежно від електричної довжини ділянки зв'язку спрямовані відгалужувачі можуть бути одноланковими (одноступінчастими) (рис. 1.2 а) і багатоланковими (багатоступінчастими) (рис. 1.2 б).

Багатоланкові відгалужувачі дають змогу збільшити зв'язок і широкосмуговість системи.

Найбільшого поширення серед спрямованих відгалужувачів зі слабким електромагнітним зв'язком набули відгалужувачі з бічним зв'язком (рис. 1.3 а). Вони виконуються на основі НВЧ методів друку на симетричних і на несиметричних смужкових хвилеводах. Серед різновидів спрямованих відгалужувачів зі слабким зв'язком слід відзначити відгалужувачі з діафрагмою між паралельно розташованими смужковими хвилеводами (рис. 1.3 б, в). Величина зв'язку такої конфігурації може регулюватися шляхом зміни величини зазору в діафрагмі.

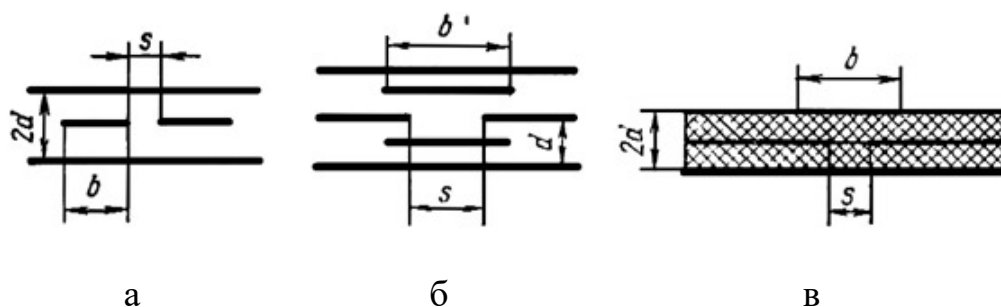


Рис. 1.3. Поперечний переріз смужкових спрямованих відгалужувачів зі слабким електромагнітним зв'язком: а - з бічним зв'язком на симетричному смужковому хвилеводі; б - зі зв'язком через діафрагму на симетричному смужковому хвилеводі; в - зі зв'язком через діафрагму на несиметричному смужковому хвилеводі з твердим діелектриком [18].

До спрямованих відгалужувачів із сильним зв'язком (малим перехідним ослабленням) слід віднести відгалужувачі з так званим лицьовим зв'язком або зі зв'язком на широких сторонах смужкових хвилеводів. При цьому пов'язані смужкові хвилеводи розташовуються або паралельно, або перпендикулярно заземленим пластинам.

Шляхом повного екранування відгалужувача або введенням додаткової рівноважувальної смужки паразитні види коливань можна виключити практично повністю.

Спрямовані відгалужувачі з ємнісним зв'язком призначені для симетричних смугових хвилеводів на частотах нижче 4 ГГц (рис. 1.4 а). Небажаний індуктивний зв'язок виводів відрізків смужкових хвилеводів послаблюється через перпендикулярне розташування смужкових хвилеводів у місцях їхнього зв'язку, де вони відокремлені один від одного діелектриком. Відстань між ділянками зв'язку дорівнює чверті довжини хвилі в смужковому хвилеводі. Зі збільшенням числа послідовно включених відгалужувачів (рис.1.4 б) спрямованість зростає.

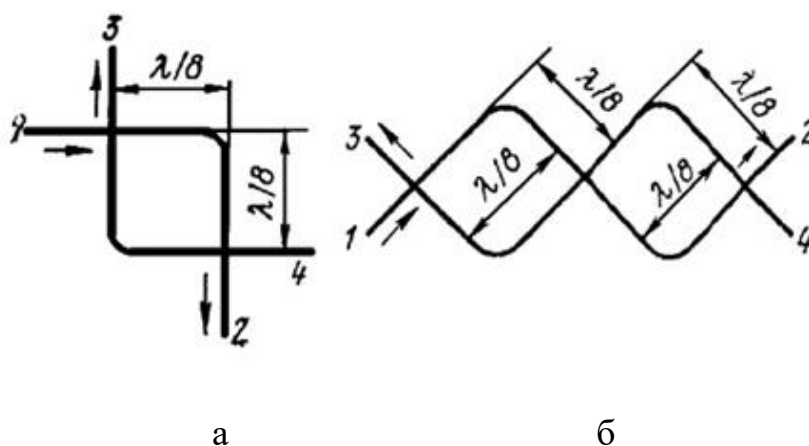


Рис. 1.4. Схеми односекційного (а) і двосекційного (б) відгалужувачів із ємнісним зв'язком [18].

Зв'язок у таких спрямованих відгалужувачах обирають досить сильним, оскільки обмежувальним чинником вибору слабшого зв'язку є пропорційне зменшення спрямованості.

1.4 Спрямовані відгалужувачі на дзеркальних діелектричних хвилеводах

Розглянемо спрямовувальні властивості та умови формування характерної структури поля для створення високоефективної випромінювальної системи на основі одного з різновидів смужкових діелектричних хвилеводів - дзеркального діелектричного хвилеводу [19].

Перспективним напрямком у створенні нових функціональних елементів є використання ізольованих дзеркальних діелектричних хвилеводів. Такого роду конструкціям притаманна одна суттєва особливість - обмеженість можливості варіації геометричних розмірів допоміжних елементів (наприклад, випромінювальних елементів) та їхнього місця розташування внаслідок відносної малості геометричних розмірів базового елемента конструкції - діелектричного стрижня.

Схематичне представлення розглянутої структури представлено на рис.1.5.

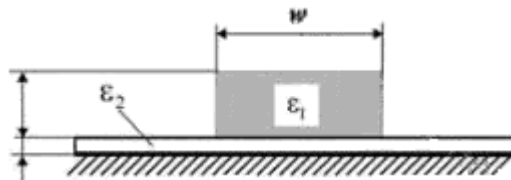


Рис. 1.5. Схематичне представлення досліджуваної структури [19].

Суттєвими особливостями такої структури є: співвідношення між діелектричними проникностями $\epsilon_2 > \epsilon_1$ та більш суттєва товщина підстильної підкладки порівняно з конструкцією ізольованого дзеркального діелектричного хвилеводу.

Така електродинамічна система за належного вибору співвідношення геометричних розмірів і матеріальних констант діелектричних матеріалів

забезпечує каналізацію енергії електромагнітного поля в заданому напрямку. Конструкція збудника такої метало-діелектричної структури представлена на рис. 1.6.

Кут скосу діелектричного стрижня вибирається в інтервалі $+2^\circ$ від значення кута Брюстера. Суттєвим виявляється і величина занурення діелектричного стрижня в металевий хвилевід. За оптимального співвідношення всіх зазначених параметрів досягнемо рівень КСХВ не більше 1.58 і рівень загасання не більше - 0.35 дБ/см.

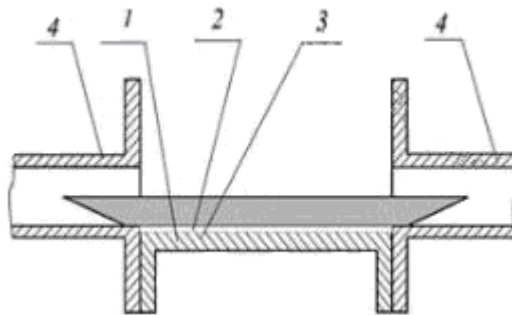


Рис. 1.6. Конструкція збудника структури: 1-діелектричний стрижень; 2 - діелектрична підкладка; 3 - заземлювальна основа; 4 - хвилевід, що збуджує [19].

Ключовим моментом для створення оптимальних умов витікання електромагнітної хвилі з діелектричного стрижня в напрямках, перпендикулярних до площини стрижня, є вибір співвідношень між шириною діелектричного стрижня та товщиною підстильної підкладки і співвідношення їхніх діелектричних проникностей.

1.5 Спрямовані відгалужувачі на діелектричних хвилеводах і щілинних лініях передачі

Існують три типи спрямованих відгалужувачів на ДХ: з розподіленням

зв'язком, що використовують локальний зв'язок, і зі спрямованим перевипромінюванням сигналу у вторинний канал [10].

Принцип роботи СВ з розподілим зв'язком ґрунтується на збудженні синфазних і протифазних хвиль із різними коефіцієнтами розповсюдження. У результаті взаємодії цих хвиль відбувався обмін енергією між діелектричним хвилеводом і перерозподіл частини потужності у другорядний хвилевід. Характеристики СВ з розподілим зв'язком за перехідного ослаблення, що дорівнює 3 дБ, показано на рис. 1.7 а.

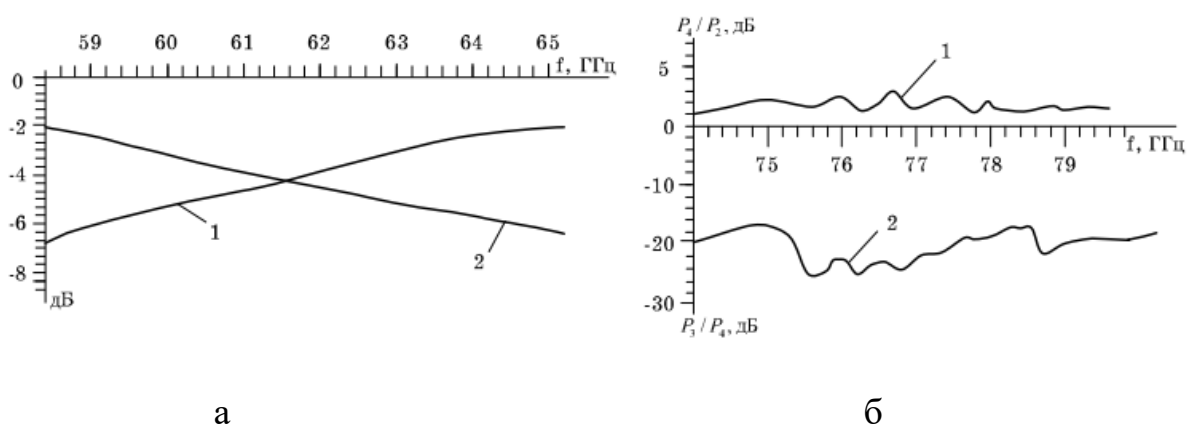


Рис. 1.7 Характеристики СВ на базі діелектричних хвилеводів: з розподілим зв'язком (а) (передана потужність P_2/P_1 -1, відгалужувальна потужність P_4/P_1 - 2, P_1 - потужність вхідного сигналу); зі зломом хвилеводу (б) (1 - ослаблення, 2 - спрямованість, P_2 та P_4 - передані потужності, P_3 - потужність зворотної відгалуженої хвилі) [20].

Перехідне ослаблення в 3 дБ має місце в досить вузькій смузі робочих частот. Це зумовлено сильною частотною залежністю фазових швидкостей хвиль парних і непарних типів у зв'язаних хвилеводів. Розширити смугу робочих частот відгалужувачів на ДХ можна, використовуючи ефект спрямованого перевипромінювання сигналу з ділянки різкого зламу ДХ.

У відгалужувачах із локальним зв'язком перехідне ослаблення пропорційне куту між ДХ. При достатнім великим кутам, коли ефект розподіленого зв'язку нехтуванням малий, відгалужувачі з локальним зв'язком досить ширококутові і забезпечують спрямованість понад 25 дБ.

Побудова СВ можлива також на базі циліндричних щілинних ліній передачі енергії, які за своїми властивостями аналогічні ДХ. Частка потужності, відгалуженої на одиниці довжини області зв'язку, визначається перекриттям власних хвиль, що поширюються в кожній із ліній передачі. Таким чином, вона залежить від відстані між трактами і довжини взаємодії [20].

1.6 Хвилеводно-пучкові перетворювачі на багатозв'язних діелектричних хвилеводах

Розглянемо оптимізацію параметрів різних типів ХПП за рахунок застосування багатозв'язних діелектричних хвилеводів (БЗДХ) [8]. На рис.1.8 показано приклади поперечних перерізів БЗДХ з елементів планарного (рис. 1.8 а), круглого (рис. 1.8 б) і прямокутного (рис. 1.8 в) перерізу.

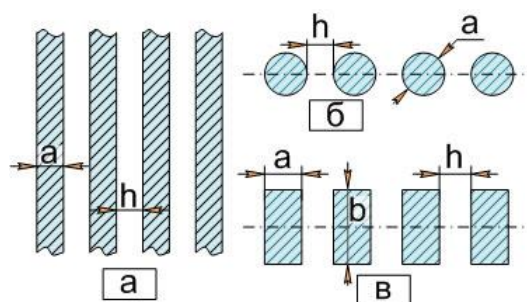


Рис.1.8. Поперечні перерізи чотиривзв'язних БЗДХ: а - із планарних; б - із круглих елементів; в - із прямокутних елементів [8].

Функції наявних хвильових підсистем діагностики [21]:

- перетворення зондувального сигналу у вхідному одномодовому плечі ХПП у зондувальне хвильове утворення;

- перетворення інформаційного хвильового утворення в інформаційний сигнал у хвилеводі підсистеми обробки.

У процесі досліджень встановлено, що:

- а) хвильові підсистеми доцільно виконувати з діелектрика;
- б) елементною базою наявних підсистем є відрізки ДХ;
- в) нові завдання (зокрема, багатоканальні) вимагають пошуку нової елементної бази.

Існують такі підстави для побудови ХПП та інших хвильових пристроїв на базі БЗДХ:

- ідеальне зондувальне хвильове утворення - хвильовий пучок діаметром від 3 до 20 λ . Збудження такого пучка можна ефективно здійснити саме торцем БЗДХ;
- ХПП - перехід від одномодового ДХ до БЗДХ доцільно реалізувати шляхом з'єднання ступенів БЗДХ з різним числом елементів;
- усі елементи хвильової підсистеми загалом (включно з багатоканальними ХПП), можна розглядати як відрізки складного складового БЗДХ.

Взагалом хвилеводно-пучкові перетворювачі слугують для виконання двох наборів функцій :

- а) формування перед апертурою ХПП (у ділянці діагностики) зондувальних хвильових утворень у вигляді одного або декількох зондувальних хвильових пучків, що збуджуються від одномодових хвилеводів;
- б) приймання інформаційно-хвильових утворень, їхнє просторове опрацювання і перетворення в інформаційні сигнали у вхідних хвилеводах.

ХПП на БЗДХ найпростіше виконувати у вигляді послідовного з'єднання декількох відрізків БЗДХ. Ці відрізки можуть бути регулярними або нерегулярними. Початкова зі ступенів - відрізок одномодового ДХ, яким приходить зондувальний

сигнал, а кінцева - БЗДХ такого порядку зв'язності, скільки локальних екстремумів бажано мати в розподілі поля на апертурі ХПП.

На рис. 1.9 а показано макет простої конструкції ХПП із 5-зв'язним БЗДХ на другому ступені.

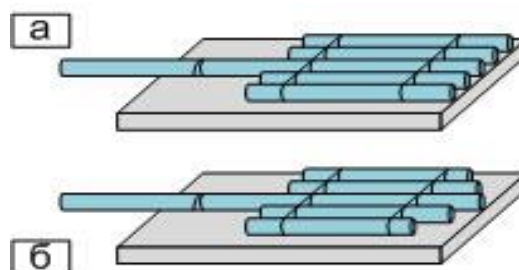


Рис. 1.9. ХПП на БЗДХ: а - 2 ступінчастий ХПП; б - ХПП із фазовим коректором [8].

Одним зі складних завдань під час побудови ХПП є одночасне забезпечення бажаних законів розподілів амплітуд і фаз полів за перерізом БЗДХ. Річ у тім, що завдяки взаємодії цих полів амплітуди і фази виявляються, як правило, взаємопов'язаними.

Це ускладнення пропонується подолати, ввівши у ХПП ступінь так званої фазової корекції. На рис. 1.9 б показано приклад конструкції ХПП із фазовим коректором на третьому ступені, у якому використано явище зміни фазового набігу локального поля БЗДХ на тій його ділянці, де діелектричний елемент віддалений [8].

Особливий інтерес становлять ХПП, виконані на так званих слабо уповільнених БЗДХ. Їхня головна відмінність - мале уповільнення фазової швидкості (близько 1% або навіть менше). Вони працюють не в повномодовому, а в маломодовому або навіть в одномодовому режимі. Загасання в таких хвилеводах

може бути значно (на порядок і більше) меншим, ніж загасання в ДХ зі значним уповільненням (10-30%).

Важливі особливості таких ХПП:

- великий відносний розмір поля на апертурі;
- повільніше спадання поля за межами перерізу БЗДХ;
- менший модовий порядок, що полегшує управління полем.

1.7 Спрямований відгалужувач на базі двох зв'язаних діелектричних хвилеводів

Діелектричний хвилевід - лінія передачі, що складається з двох і більше діелектричних тіл (шарів) з різними показниками заломлення; також, це стрижень із діелектрика або канал усередині діелектричного середовища, уздовж якого можуть поширюватися спрямовані ним електромагнітні хвилі. Форма діелектричних хвилеводів може бути довільною, але найчастіше виготовляють діелектричні хвилеводи прямокутного, круглого та еліптичного перерізів тощо [14].

Реалізуються ДХ на трьох типах зв'язку:

- розподіленого;
- локальному;
- радіаційному або дифракційному (спрямоване випромінювання сигналу з неоднорідностей у вторинний канал).

Принцип дії СВ з розподіленим зв'язком ґрунтується на взаємодії збуджених синфазних і протифазних хвиль, що мають різні фазові швидкості за взаємного проникнення полів.



Рис. 1.10. Спрямований відгалужувач на базі двох зв'язаних діелектричних хвилеводів [10]

Переваги СВ з розподіленим зв'язком:

- 1) можливість плавної зміни зазору шляхом вигину або непаралельного розташування ДХ;
- 2) плавний закон зміни зазору між ДХ по довжині сприяє високій спрямованості і малим КСХ з боку всіх плечей СВ;
- 3) менш жорсткі допуски на розміри зв'язку.

Основний недолік - недостатній частотний діапазон за перехідним ослабленням, що визначається сильною частотною залежністю фазових швидкостей хвиль парних і непарних типів у зв'язаних хвилеводів [10].

РОЗДІЛ 2

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКРАНОВАНИХ РОЗПОДІЛЕНО-ЗВ'ЯЗАНИХ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

Для оптимізації електродинамічних систем функціональних пристроїв електроніки НВЧ-діапазону широко використовується безліч методів моделювання, які добре зарекомендували себе кореляцією з експериментальними даними. Для аналізу хвильових процесів у системах, що містять у собі діелектричні хвилеводи, успішно застосовують метод ефективної діелектричної проникності [19] і метод FDTD (метод кінцевих часових різниць) [22,23].

Для чисельного моделювання хвильових процесів у досліджуваних системах використовували програмний пакет, що спеціалізується на розв'язуванні задач електродинаміки та вирізняється хорошою кореляцією теорії й експерименту [19]. Алгоритми розв'язання ґрунтуються на описаних нижче методі сіток (метод скінченних різниць) і теорії багатополосника, що базується на обчисленні матриці розсіювання і S-параметрів [24].

Цей програмний пакет чисельними методами дає змогу розв'язувати задачі електродинаміки НВЧ. Програма підходить для швидкого, ефективного аналізу та проектування компонентів, як-от антени, фільтри, лінії передавання, відгалужувачі, з'єднувачі, плати друкованої схеми, резонатори та ще багато інших.

Програмне забезпечення використовуваного програмного пакета містить чотири різні методи імітації (програма аналізу перехідних процесів, програма аналізу в частотній смузі, програма розв'язування власної моди, програма аналізу форм коливань), що є методом найкращого наближення цих приватних додатків.

2.1 Метод кінцевих різниць

Метод скінченних різниць нині є поширеним чисельним методом моделювання електромагнітних явищ у довільному середовищі. Сенс методу полягає в тому, що рівняння Максвелла (у диференціальній формі) доповнюються матеріальними рівняннями, що описують середовище, у якому поширюється електромагнітна хвиля. У загальному випадку ці рівняння для довільного середовища мають вигляд [25]:

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (2.1)$$

де \vec{D} , \vec{E} - вектор електричної індукції та напруженості поля;

\vec{B} , \vec{H} - вектор магнітної індукції та напруженості поля;

ϵ_0 і μ_0 - діелектрична та магнітна постійні;

$\epsilon = \epsilon(x, y, z, t)$ і $\mu = \mu(x, y, z, t)$ - відносні діелектрична та магнітна

проникності середовища.

Для спрощення розгляду задачі збудження електромагнітної хвилі в довільному середовищі вважають, що воно однорідне й ізотропне, тобто $\epsilon(x, y, z, t) = \text{const}$ і $\mu(x, y, z, t) = \text{const}$.

Для побудови скінченно-різницевої схеми використовується система рівнянь Максвелла в приватних похідних з урахуванням матеріальних рівнянь (2.1) у декартовій системі координат. Така система містить шість диференціальних рівнянь для шести компонент електромагнітного поля, що залежать як від просторових координат x, y і z , так і від часу t . Для переходу від безперервного континууму у

просторі та часі до дискретного, використовується просторово-часова дискретизація. Це означає, що весь простір обчислення вздовж координат x, y, z у довільний поточний момент часу t_n покривається рівномірною сіткою (M, N, K) , де M, N, K - максимальний розмір сітки розбиття відповідно вздовж осей x, y, z . У цьому випадку, у вузлах сітки розбиття в момент часу t_n значення будь-якої фізичної величини $A = f(x, y, z, t)$ трансформується у $A = f(i, j, k, t_n)$. У результаті виходить таке перетворення: $f(i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z, t_n) \Rightarrow f_n(i, j, k, t_n)$, де $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t_n$ - кроки дискретизації відповідно по осях x, y, z координат і по осі часу t . Для визначення значень просторових похідних у кожному вузлі сітки використовують інформацію про значення шуканої компоненти поля в сусідніх вузлах сітки розбиття. При цьому розглядаються двоточкова і триточкова різницеві апроксимації похідних. З урахуванням мінімізації обчислювальної нестійкості кращою виявляється триточкова апроксимація похідних або застосування шаблону типу "хрест".

Для побудови різницевої схеми, яка відповідає такому шаблону, необхідно використати вузол прив'язки таким чином, щоб під час задавання граничних умов відповідні компоненти поля потрапляли на межі розділу. В якості такого вузла вибирають вузол (i, j, k) сітки розбиття. Слід зазначити, що такий шаблон накладає обмеження на граничні умови: межа області обчислення має бути площиною, паралельною одній з осей координат. Для скінченно-різницевої апроксимації системи рівнянь Максвелла в часовій області електричні та магнітні складові електромагнітного поля визначаються на різних часових кроках, а глобальний крок обчислення стає рівним $2\Delta t$. У цьому разі забезпечується значна економія обчислювальних ресурсів, а також знижується кількість даних, необхідних для завдання початкових умов (H_n, E_{n-1}) , де n - поточний номер кроку в часі [25].

У результаті застосування описаного вище підходу, складається скінченно-різницева система алгебраїчних рівнянь, що відповідає рівнянням Максвелла в декартовій системі координат.

За аналогією всі проведені раніше міркування будуть також справедливі і для інших систем координат (наприклад, циліндричної та сферичної).

2.2 Матриця розсіювання, S-параметри, аналіз чотириполюсників

Матриця розсіювання представляє собою матрицю, у якій елементи визначають фізичні характеристики процесу розсіювання. У надвисокочастотній техніці, матриця розсіювання встановлює лінійну залежність між вхідними і відбитими хвилями на входах багатополісника [26]. Іншими словами, дана матриця використовується і для математичного опису характеристик спрямованих відгалужувачів.

Кожен вхід багатополісника в області надвисоких частот відображається лінією передачі з основною модою. Таким чином, на кожному вході багатополісника виникають як прямі a_n , так і зворотні b_n хвилі.

Матриця розсіювання визначає взаємозв'язок між змінними a_n (пропорційними вхідним хвилям на n-й парі полюсів) і b_n (пропорційними вихідним хвилям n-й пари полюсів) [14]:

$$a_n = v_n^+ / \sqrt{Z_{0n}} \quad (2.2)$$

$$b_n = v_n^- / \sqrt{Z_{0n}} \quad (2.3)$$

де v_n^+ і v_n^- - напруги, що відповідають вхідним і вихідним хвилям у лінії передачі, з'єднаній з n-ю парою полюсів;

Z_{0n} - хвильовий опір лінії.

Якщо уявити падаючі та відбиті хвилі на входах багатополюсника у вигляді векторів a_n і b_n [26]:

$$a_n = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix}; b_n = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

У загальному випадку для схеми з n -парами полюсів маємо:

$$b = S \cdot a, \quad (2.8)$$

де S -матриця розміром $n \times n$ (для чотиріполюсника ця матриця має розмір 2×2), звана матрицею розсіювання заданої схеми пристрою.

Записується таким чином:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{pmatrix}. \quad (2.9)$$

Для визначення середньої потужності на вході n напруги і струми на підставі теорії ліній передачі записуються у вигляді [14]:

$$v_n = v_n^+ + v_n^- = \sqrt{Z_{0n}}(a_n + b_n), \quad (2.10)$$

$$i_n = (1/Z_{0n})(v_n^+ - v_n^-) = (1/Z_{0n})(a_n - b_n), \quad (2.11)$$

тоді потужність на вході визначається як:

$$W_n = 0,5 \operatorname{Re}(v_n, i_n^*) = 0,5(a_n a_n^* - b_n b_n^*) \quad (2.12)$$

З цього виразу видно, що потужність W_n дорівнює різниці потужностей падаючої $0,5(a_n a_n^*)$ і відбитої $0,5(b_n b_n^*)$ хвиль на вході n .

Перевагою математичного опису ланцюгів за допомогою S -матриць є можливість вимірювань S -параметрів. Вимірювання S -параметрів чотирьох полюсників здійснюються у разі під'єднання до одного або іншого входу нормувального опору Z_0 , (зазвичай 50 Ом). При цьому вимірювані величини, такі як коефіцієнти відбиття і коефіцієнти передачі, безпосередньо виражаються через параметри розсіювання. Інша важлива перевага використання S -матриць полягає в тому, що S -параметри визначаються на основі хвилі, що поширюється, на відміну від струмів або напруг, і хвильові змінні не змінюються за амплітудою при русі вздовж лінії без втрат. Це дає змогу вимірювати S -параметри досліджуваного пристрою на деякій відстані від його фізичного місця розташування. Вплив допоміжної лінії з малими втратами може бути враховано зміною фази, що еквівалентно зсуву площини відліку.

Найважливішими властивостями S -матриць є такі [27]:

1. Для взаємних ланцюгів S -матриця симетрична, тобто:

$$S = S^t, \quad (2.13)$$

де індекс t означає транспонування матриці.

2. Для пасивних ланцюгів без втрат:

$$\sum_{n=1}^N |S|^2 = \sum_{n=1}^N S_{n1} S_{n1}^* = 1 \quad (2.14)$$

для всіх n . Рівняння (2.14) є прямим наслідком закону збереження енергії пасивних ланцюгів без втрат.

3. У пасивних ланцюгах без втрат:

$$\sum_{n=1}^N S_{ns} S_{nr}^* = 0 \quad (\text{для всіх } s, r = 1, 2, \dots, N, s \neq r). \quad (2.15)$$

Умови (2.14) і (2.15) обмежують число незалежних елементів у матриці розсіювання розміром $N \times N$ до $N(N+1)/2$. Матриця, що задовольняє цим двом умовам, називається унітарною. Мовою матричних операцій ці умови мають вигляд:

$$A^* = [A']^{-1}. \quad (2.16)$$

Це рівняння означає, що в разі пасивного ланцюга без втрат комплексно сполучена матриця розсіювання є оберненою транспонованою вихідною матрицею.

2.3 Досліджувані електродинамічні моделі та результати чисельного моделювання

Дотримуючись цілей в даній роботі, для оцінки впливу близькості екрану до ДХ на хвильові процеси всередині досліджуваної системи, що визначається двома

близько розташованими один відносно іншого ДХ, доречно виконати первинні дослідження електродинамічних характеристик простіших її складових. Також перспективно визначити вплив на хвильові процеси і провідникових властивостей екранів (провідність, геометричні розміри, їх конструкцію).

З урахуванням вище сказаного, загальну модель екранованих, розподілено-зв'язаних ДХ, котра представлена на рисунку 2.2, можна умовно поділити на три об'єкти:

- діелектричний хвилевід;
- два розташованих поруч на відстані a ДХ;
- два розташованих поруч на відстані a ДХ з першим або другим екранами на відстані до ДХ b та h відповідно.

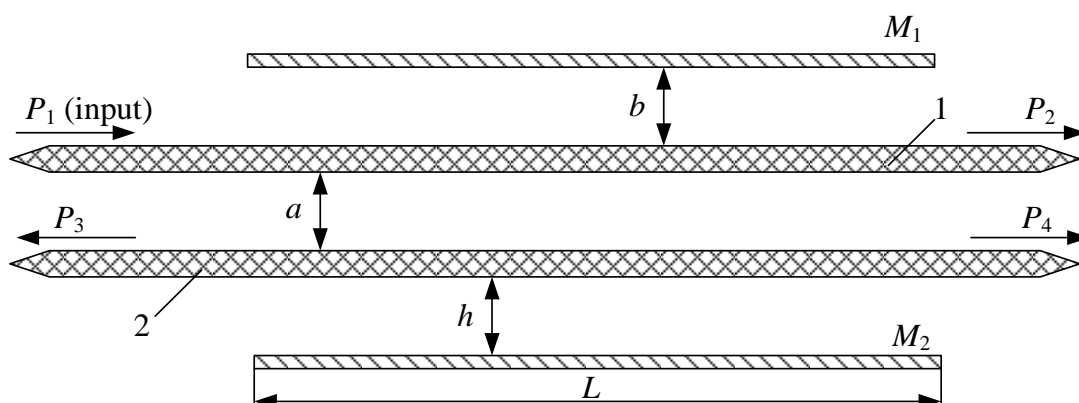


Рис. 2.2. Загальна теоретична модель, що досліджується

Дослідження системи проводилося в межах певного діапазону частот, який був визначений частотними характеристиками експериментального устаткування, на якому можливо провести експериментальне дослідження. Довжина теоретичної моделі визначилась у $L = 200$ мм, що приблизно відповідало можливостям експериментальних макетів.

Однією з найпростіших систем, що визначає основні характеристики більш складної електродинамічної моделі, є ДХ. Розрахункова 3D модель діелектричного хвилеводу представлена на рисунку 2.3.

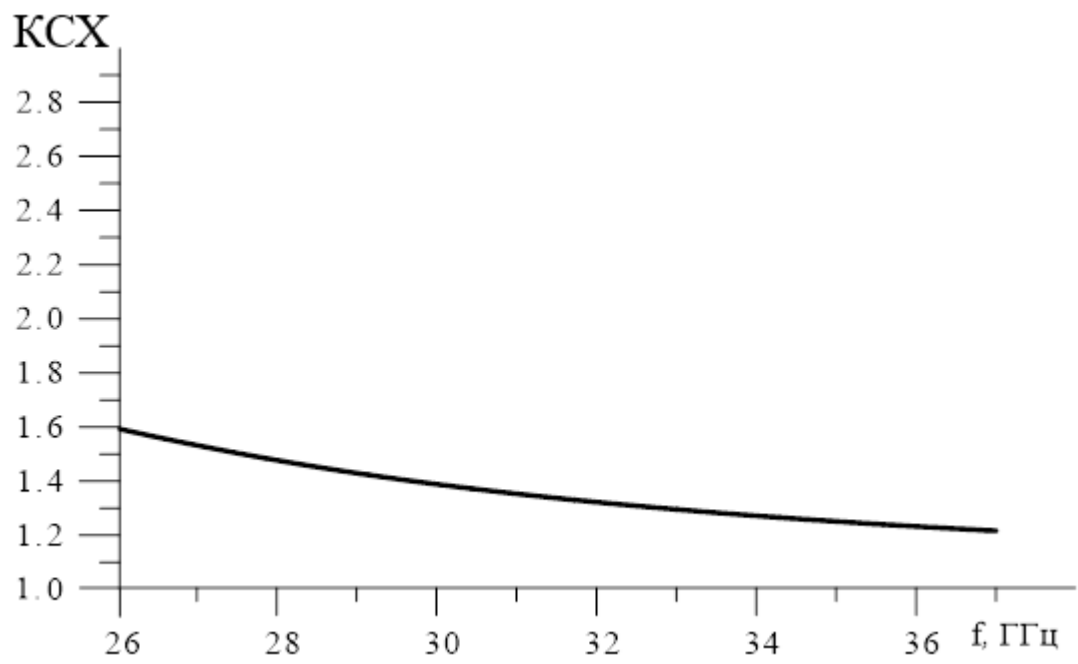


Рис. 2.3. Однохвилеводна модель без екрана

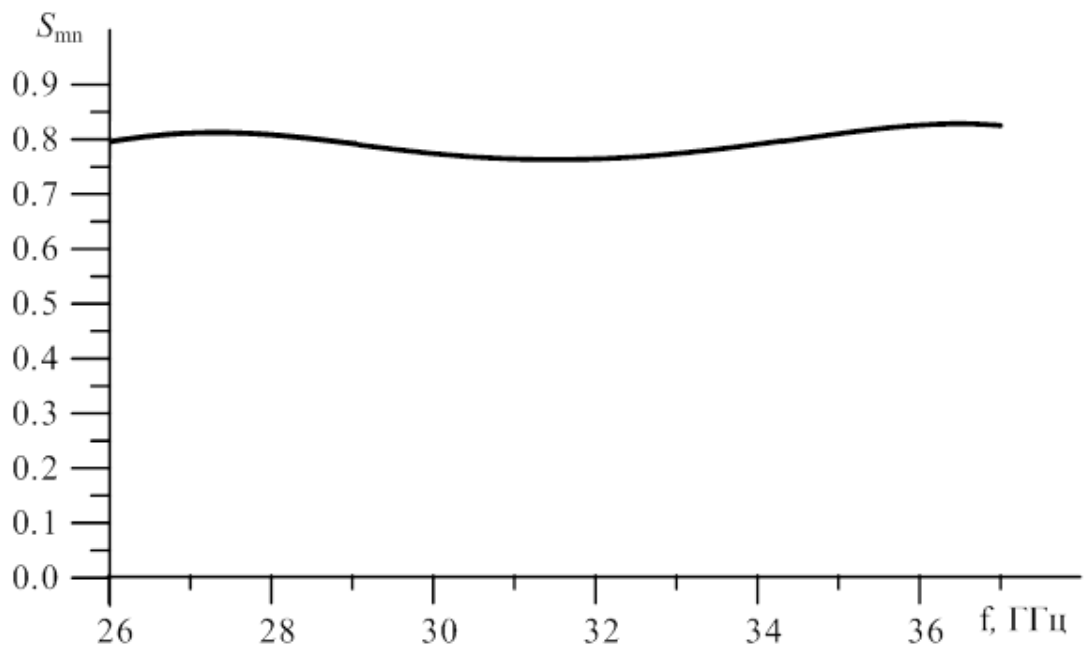
На кінцях діелектричного хвилеводу були встановлені порти перетини - віртуальні площини, що враховували проходження електромагнітної енергії через них в обох напрямках та мали площу торців. Важливо відзначити, що діелектричний хвилевід являє собою лінію поверхневих хвиль, і в даному випадку не враховувалися як компутація діелектричного хвилеводу з металевим хвилеводом. Також відсутні були засоби узгодження.

На рисунку 2.4 наведено електродинамічні характеристики відрізка регулярного діелектричного хвилеводу (рисунок 2.3) у вигляді залежностей КСХ і коефіцієнта поширення електромагнітних хвиль по діелектричному хвилеводу S_{21} від частоти. Елемент матриці розсіювання S_{21} , згідно за теорією чотирьох полюсників, формулює відношення вихідного сигналу до вхідного.

При аналізі базових характеристик можна визначити, що значення коефіцієнта проходження складає $0,75 \div 0,8$ на усьому частотному інтервалі, а КСХ змінюється від 1,8 до 1,2. Зниження значень S_{21} , скоріше за все, пояснюється відсутністю узгоджувальних пристроїв на всьому частотному діапазоні. Ці залежності мають рівномірний характер, аналогічний тим, що були отримані під час експериментального моделювання. З урахуванням якісного характеру дослідження та його мети можна вважати, що ці невеликі недоліки чисельної моделі являються неprinциповими.



а



б

Рис. 2.4. Електродинамічні параметри ДХ: а) КСХ; б) S_{21} , (коефіцієнт розповсюдження моди)

Наступна еволюційна електродинамічна модель включає два паралельно розташованих діелектричних хвильовода, є аналогом загальновідомого пристрою спрямованого відгалужувача на розподіленому зворотньому зв'язку, котра описана у розділі 1.

Чисельно досліджена двоххвильовідна модель, представлена на рисунку 2.5, складається із двох ДХ розмірами $3,6 \text{ мм} \times 7,2 \text{ мм} \times 200 \text{ мм}$. Вони взаємодіють через збуджені синфазні та протифазні хвилі з різними фазовими числам, що призводить до перевипромінювання енергії між діелектричними хвильоводами та відгалуження частини потужності у допоміжний канал.

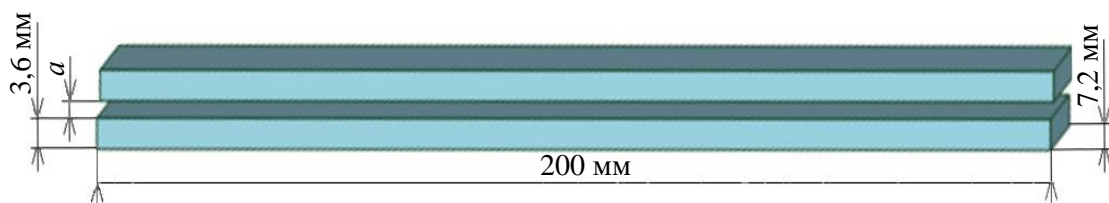


Рис. 2.5. Модель двоххвильоводного СВ на ДХ

Управління ступенем відгалуження енергії між ДХ здійснюється за допомогою зміни параметрів області зв'язку, що розташована між хвильоводами. В даному випадку визначальною у вищевказаних процесах є відстань між діелектричними хвильоводами a (див. рис. 2.5). Крім параметра a , на інтенсивність взаємозв'язку між хвильоводами можна впливати зміною ефективної області взаємодії (вигін одного хвильовода, їх взаємне зміщення по різних напрямкам). Данні маніпуляції у роботі не досліджувались.

З метою оцінки та порівняння був вибраний метод керування електродинамічними характеристиками двох діелектричних хвильоводів (основного та вторинного) за допомогою параметра a . На рисунку 2.6 наведено типові частотні залежності коефіцієнта поширення, розраховані для різних відстаней між

діелектричними хвильоводами. Параметр S_{21} позначає коефіцієнт поширення для основного діелектричного хвильоводу (P_2/P_1), тоді як параметр S_{41} - для допоміжного (P_4/P_1).

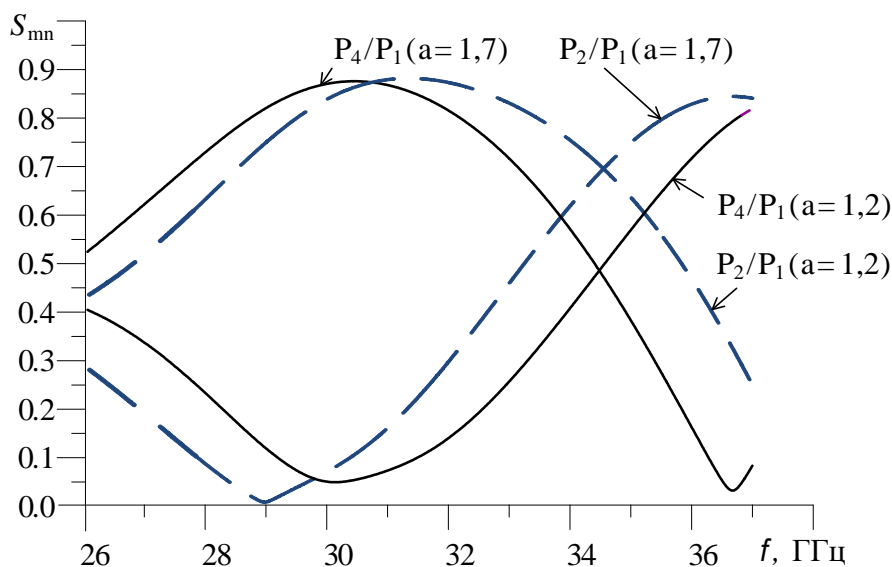


Рис. 2.6. Залежності коефіцієнтів поширень у першому S_{21} і другому S_{41} ДХ від розмірів зазорів: $a=1.22$ мм; $a=1.75$ мм

Варіація параметра a реалізовувалась в межах значень від 0.65 до 1.9 мм. При достатній протяжності області взаємодії ($L = 200$ мм) була встановлена можливість перехідних режимів: режимі, майже повної передачі енергії основної хвилі (до 90%) у другорядний ДВ; і режим «регулярного хвильовода» при якому відгалудження майже відсутнє у частотному діапазоні приблизно 2/3 ГГц. Чередування режимів спостерігається періодично за $\Delta a \approx 0,5$ мм, як показано на рисунку 2.6. Розсинхронізація між хвилями спостерігається за зміною умов синфазності, коли змінюється взаємна відстань. Крім того потрібно враховувати і обмеженість (кінцевість) розмірів ДХ.

Поведінка залежностей КСХВ від частоти була подібною до поодинокого хвильоводу, представленого на рисунку 2.4 а, котра є результатом його регулярності. Зменшення відстані між ДХ підсилює можливість до інтерференції прямої та збудженої хвиль. І цей процес, можливо, впливатиме на появу, у тому числі,

зворотніх хвилеводних хвиль (зростанням значень S_{11} і S_{31}). Це може пояснити зміну КСХВ на 0,14 одиниць при низьких частотах і на 0,07 на високочастотній ділянці.

Провідні екрани мають низку способів впливу на умови розповсюдження хвиль по ДХ. По перше, розташування ДХ на металевій площині приводить до зміни ефективного перерізу ДХ, а значить з'являється зміна руху хвилеводної хвилі біля поверхні ДХ, що у свою чергу вплине на зв'язок між діелектричними хвилеводами. Реальність даних припущень підтверджується вже існуючими типами хвилеводних та інших функціональних пристроїв, у яких цей параметр дорівнює 0. Вони мають назву дзеркальних систем.

На основі вищевикладеного, та пам'ятаючи, що екрани не є узгодженими із ДХ (різка межа зміни параметрів двох середовищ, без їх вигинів) вплив екранування хвилеводів доцільно проводити у декілька етапів, що відповідатимуть окремим спрощеним моделям:

1. Екранування основного хвилевода. Взаємна відстань b за сталого параметра a (див. рис. 2.7а).
2. Екранування другорядного хвилевода. Взаємна відстань h за сталого параметра a (рис. 2.7б).
3. Зміна області екранування параметр L за сталих параметрів параметрів a і h (рис. 2.7в).
4. Зміна інтенсивності екранування (випадок використання тонкого шару напівпровідника із наведеною провідністю або стрічкових періодичних структур у тому числі і нанорозмірних). Параметри шару обирались: відносна діелектрична проникність $\epsilon = 11$, провідність $\sigma = 10^{-2} \div 10^6$ Ом/м.

Розглянемо перший випадок. Переміщення металевого екрана у межах $b \approx 0,1 - 0,9$ мм проявлялось у зростання значень КСХВ і до нерівномірності характеристики (див. рис. 2.8), що свідчить про наявність сильного взаємного

зв'язку між металевим дзеркалом і основним хвилеводом та відсутності узгодженості між ними

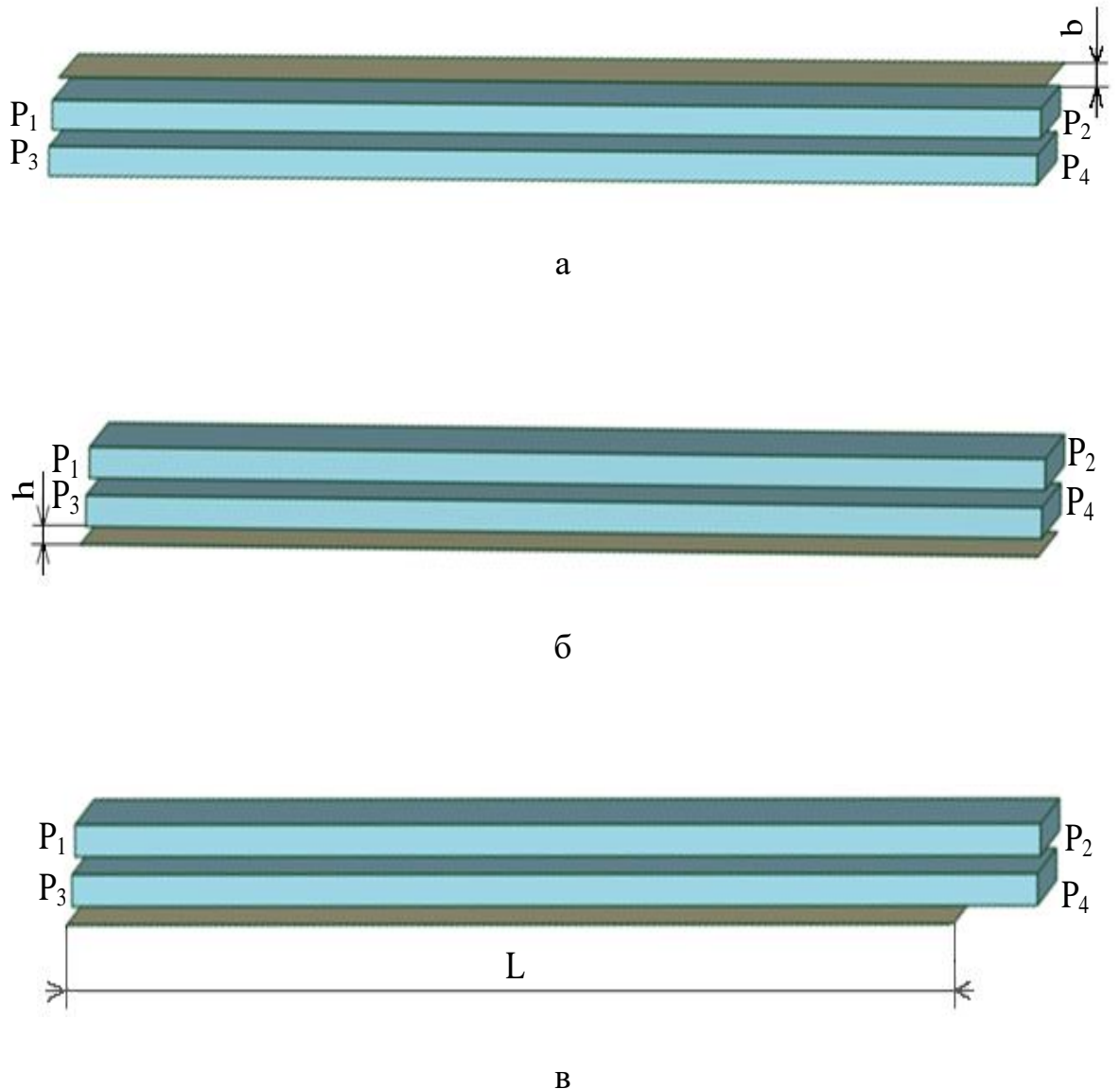


Рис. 2.7. Варіації екранованих систем, що досліджувались: а) двоххвильовидна модель із верхнім екраном, котрий відбиває; б) модель із нижнім екраном, котрий відбиває; в) модель змінною довжиною L екрана

У такому розташуванні металевого екрана виникає неоднорідність для хвиль, що пролягають по поверхні основного діелектричного хвилеводу, вимагаючи подальшого його узгодження шляхом плавної деформації на кінцях, зміни кута нахилу хвилеводів, тощо. Ступінь неузгодженості спадає при віддаленні екрану від

хвильоводу. Суттєвий вплив на утворення зворотної хвилі в основному тракті робить перший варіант, принаймі без заходів узгодження не перспективним.

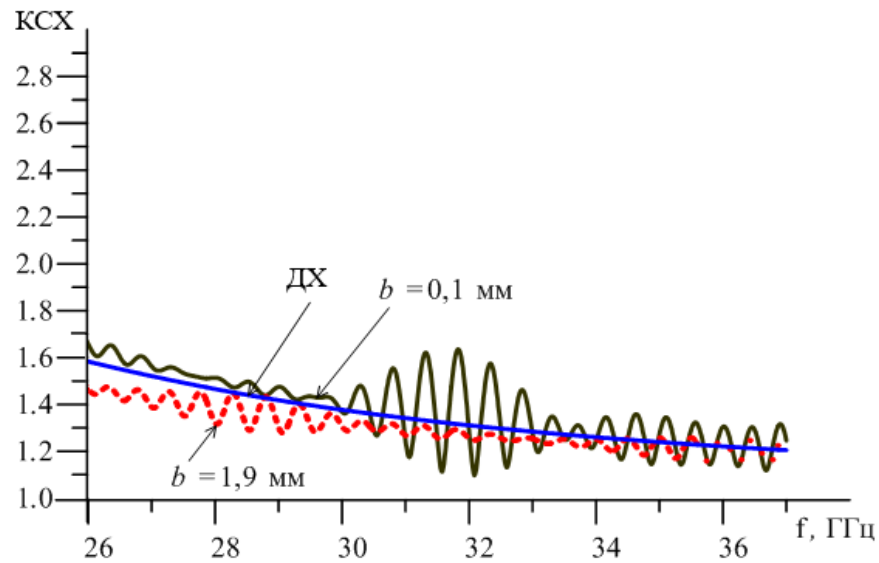


Рис. 2.8. Залежності КСХН від частоти для моделі 1-го типу, для різних значень відстані між металевим екраном та основним ДХ

Хоча, якщо не зважати на неузгодженість системи хвильоводів то результати числового моделювання свідчать про можливість ефективного керування перерозподілом енергії в хвильоводах (див. рис. 2.7а). На рисунку 2.9 представлені типові залежності параметрів S_{mn} , що відповідають коефіцієнтам розповсюдження у першочерговому ДХ (P_2/P_1) та другорядному ДХ (P_4/P_1) хвильоводи для значень параметрів $a = 1,8$ мм, та $b = 0,1$ мм і $b = 1,6$ мм.

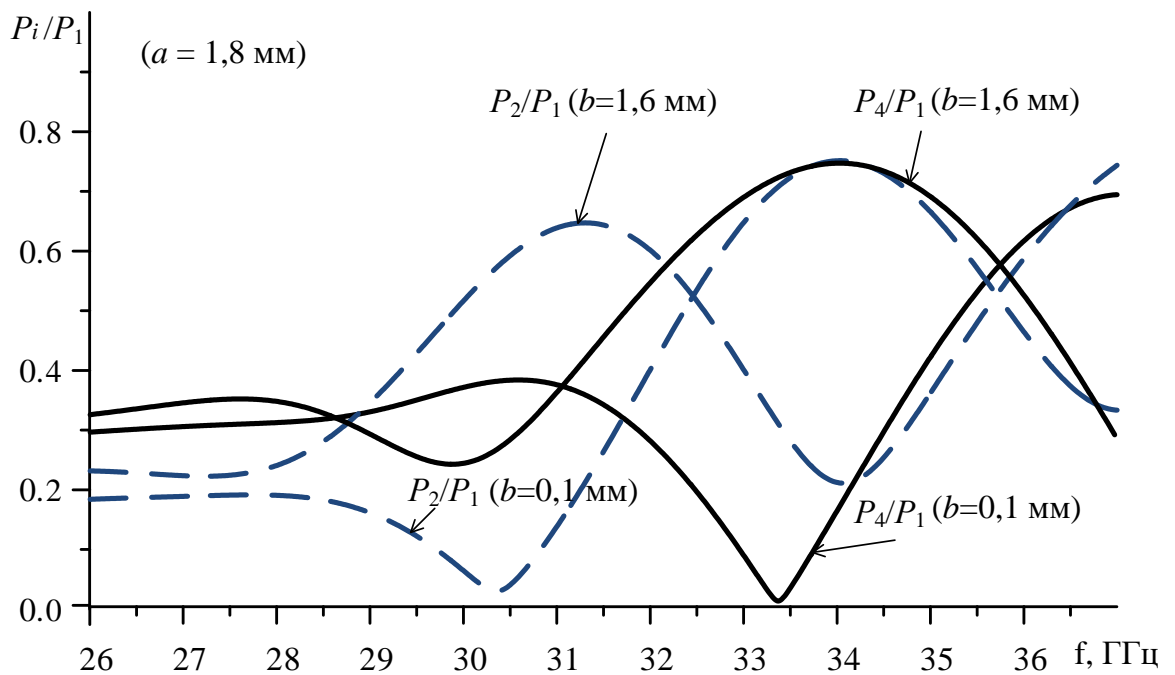


Рис. 2.9. Залежності коефіцієнтів розповсюдження (S_{mn}) від частоти для різних відстаней між основним хвилеводом і екраном

Зміна відстані b між екраном і основним ДХ (див. рис. 2.2) спричиняє періодичну зміну коефіцієнтів розповсюдження, а значить і відгалудження енергії, із періодом $\Delta b \approx 1,5$ мм для фіксованих частот. Збільшення періоду підлаштування відстанями з одного боку вказує на зменшення чутливості способу керування, а з другого боку може бути корисним при використанні у більш високочастотній області, для якої експоненційна залежність впливу на взаємозв'язок становить практичну проблему прецизійності пристроїв зсуву елементів СВ.

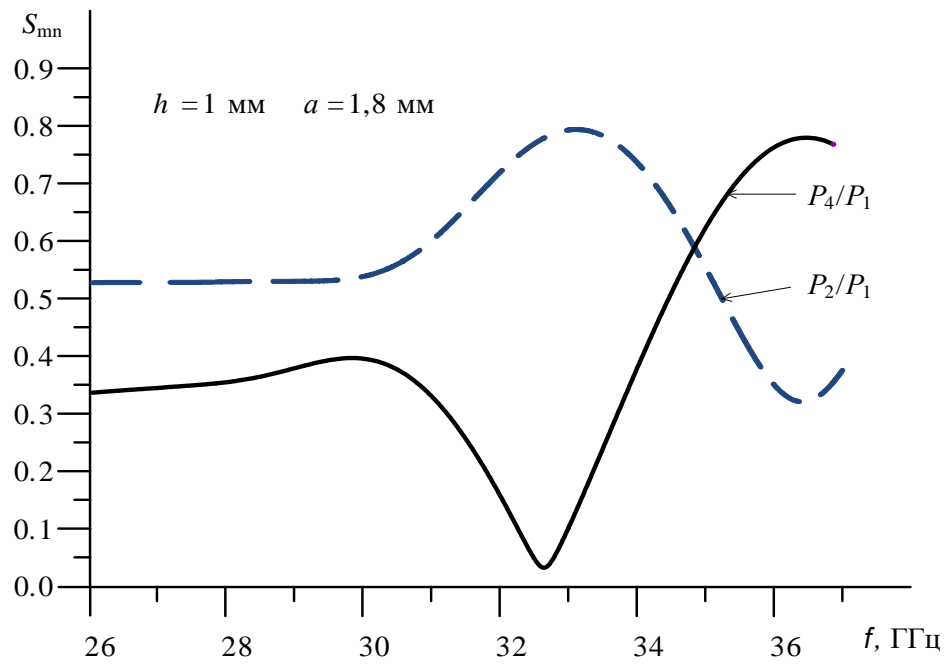
Окрім того, розташування металевого екрану біля першочергового хвилеводу впоиває на звуження частотного діапазону перерозподілу енергії між першорядним та другорядним діелектричними хвилеводами. Відмінність керуючого параметра a , проявляється у тому, що параметр b додатково зсуває мінімуми та максимуми значень S-параметрів за частотою в бік більших значень, що і відображено на рисунку 2.9.

Отже, доведено факт впливу металевої площини, розташованої в області основного хвилеводу, суттєво впливає на узгодженість всієї системи, що досліджувалась.

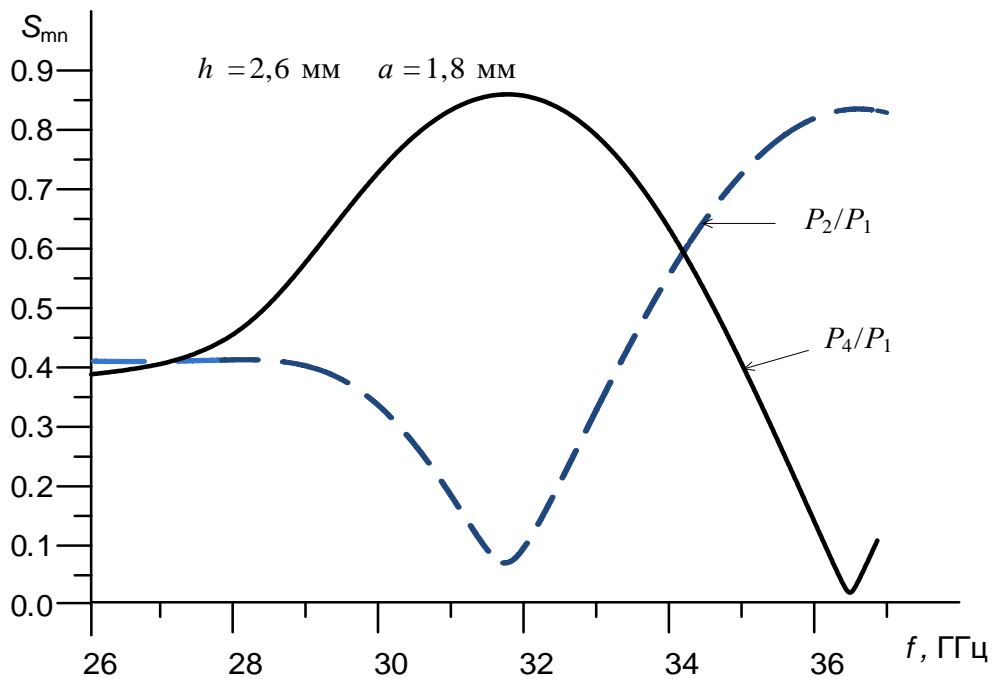
У цілому, розташування металевого екрана під другорядним хвилеводом ДХ (див. рис. 2.2) послаблює зв'язок хвиль і значення КСХН для основного тракту доходить до 1.34. Система поводить себе подібно до вищерозглянутого випадку екранування основного ДХ майже із такою самою чутливістю керуючого фактора (рис. 2.10). Відмінність полягає у меншій неузгодженості загальної системи за рахунок меншої амплітуди відгалуженої хвилі, а значить і меншої амплітуди утвореної зворотної хвилі.

У декотрих ситуаціях реалізація настільки протяжної області розподіленого зв'язку може бути складною. Зазвичай розподілений зв'язок може змінюватися від протяжного (розподіленого) до істотно скороченого. Здебільшого дії узгодження хвилеводу і екрану, разом із конструктивними обмеженнями, можуть суттєво на нього вплинути. Таким чином, важливо досліджувати вплив протяжності екранування на хвильові процеси в системі.

Аналіз впливу розміру області екранування, дозволяє зробити висновок, що протяжність екранування, аналогічно, як і взаємні відстані, надає можливість керувати перерозподілом енергії. На рис. 2.11 а, б наведено хвильові характеристики системи із двома ДХ з металевим екраном змінної геометрії.

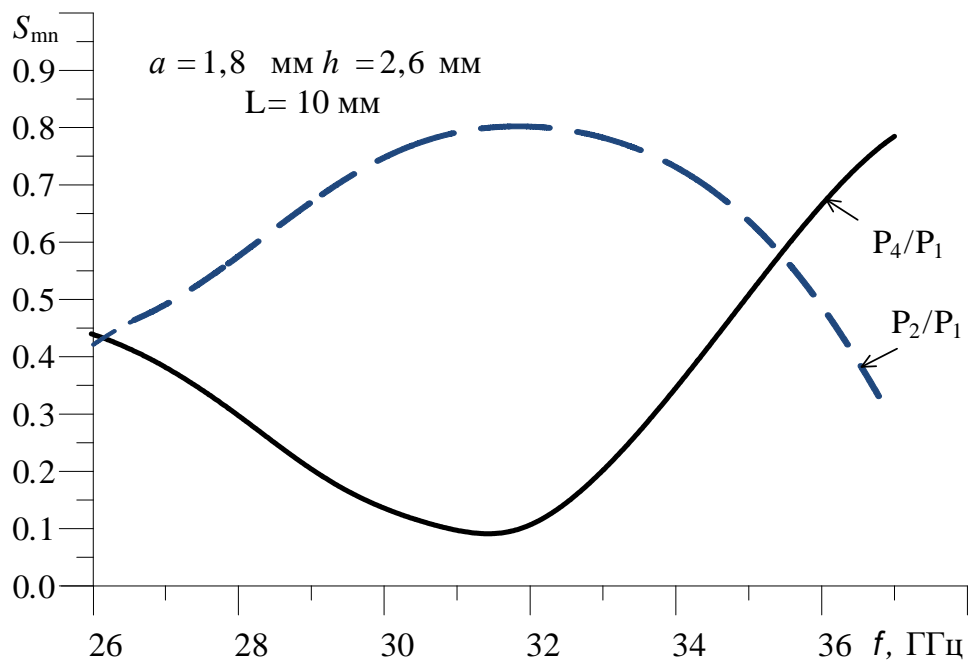


а

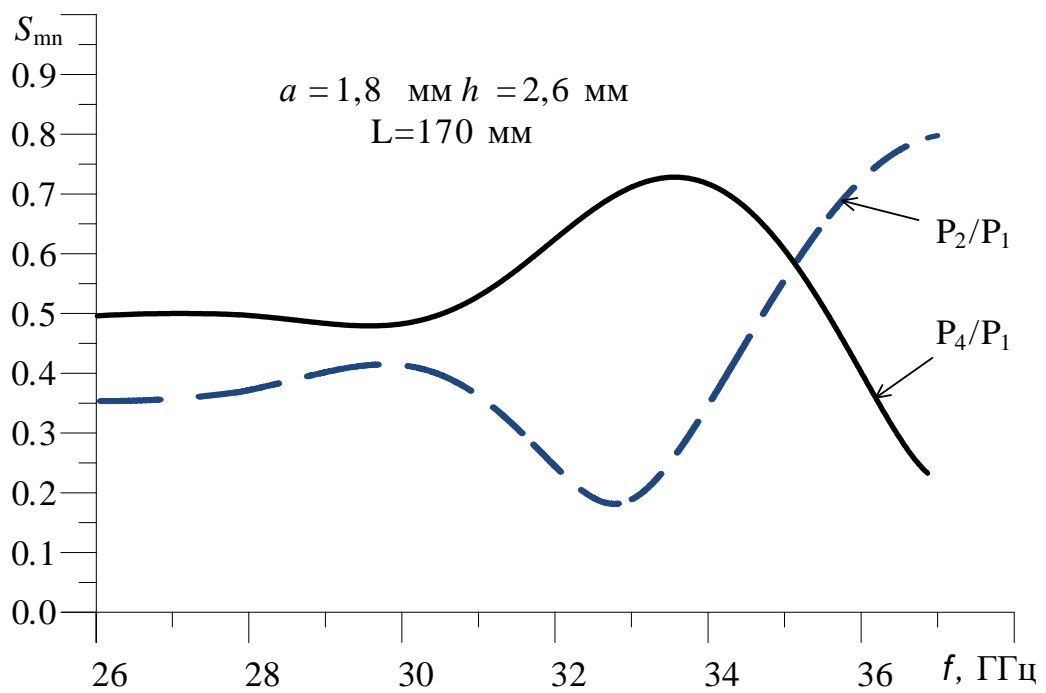


б

Рис. 2.10. Залежності коефіцієнтів проходження від значень h для сталей $a = 1,8$ мм: а) $h = 1$ мм; б) $h = 2,6$ мм



а



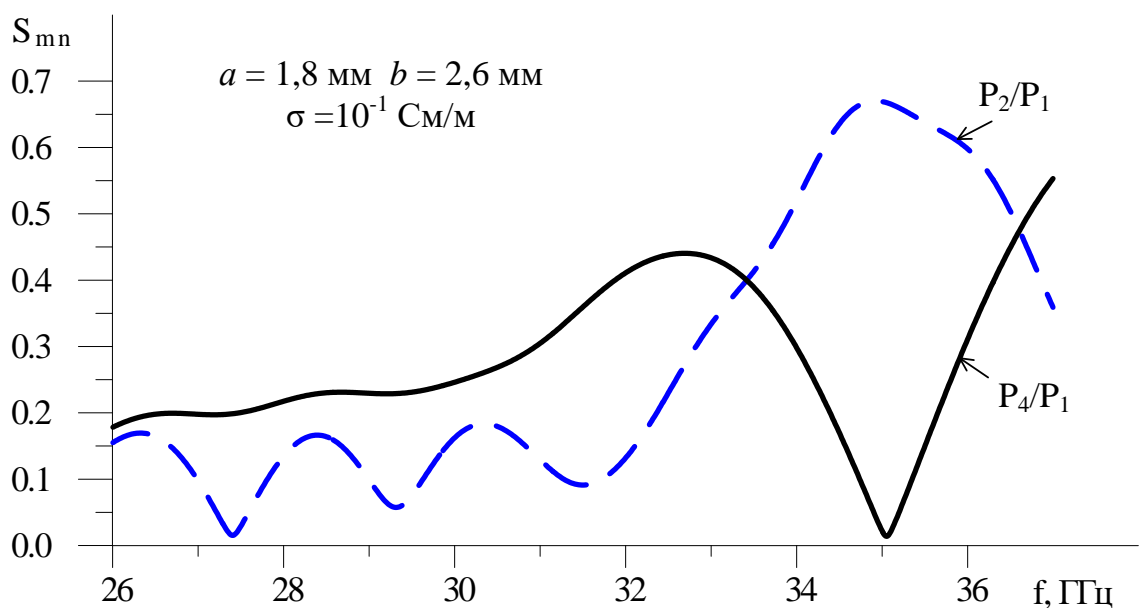
б

Рис. 2.11. Залежності коефіцієнтів проходження від значень L і сталих $a = 1,8$ мм і $h = 1$ мм: а) $L = 10$ мм; б) $L = 170$ мм

Досліджувалась зміна протяжності екранування L з 2 00 мм до 5 0 мм. Реакція системи (модель 3 – го типу) спостерігалась також у зміні коефіцієнтів проходження від максимальних до мінімальних значень для сталих частот.

Протяжність зони екранування також впливає і на узгодженість екрану і ДХ, тобто проявляється властивість одночасно впливати на ступень відгалудження енергії і узгодженість системи, що проявляється у покращенні значень КСВН.

Заміна металевого екрана на напівпровідниковий аналог з $\epsilon = 11$ також дає підставу вважати про можливість керування хвильовими параметрами двоохвильової системи (рис. 2.2) зміною провідності напівпровідникового шару. За фіксованих значень відстаней між хвильоводами a і параметра b , зміна провідності від значень $\sigma \approx 10^{-1}$ См/м в два рази також відображається на зміні коефіцієнтів проходження, які переходять від максимальних до мінімальних значень. Так, на рис. 2.12 представлено частотні залежності коефіцієнтів поширення (S-параметрів) для різних значень провідності діелектричного шару. Подальше збільшення провідності до суттєвих змін у перерозподілі енергії між двома діелектричними хвильоводами до істотних змін не призводить.



а

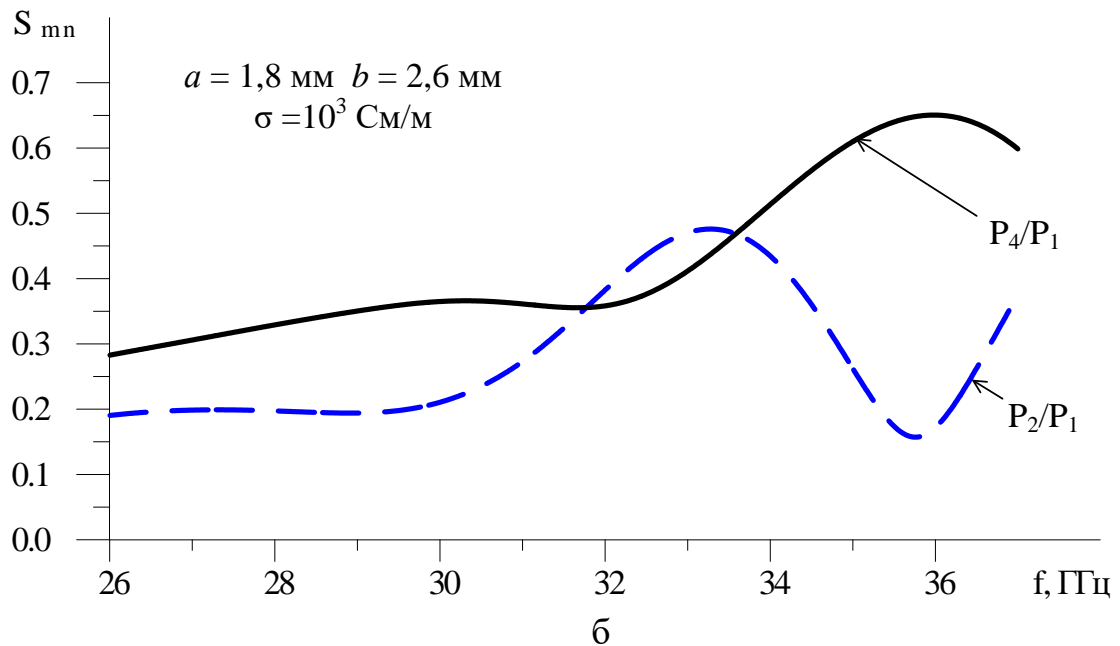


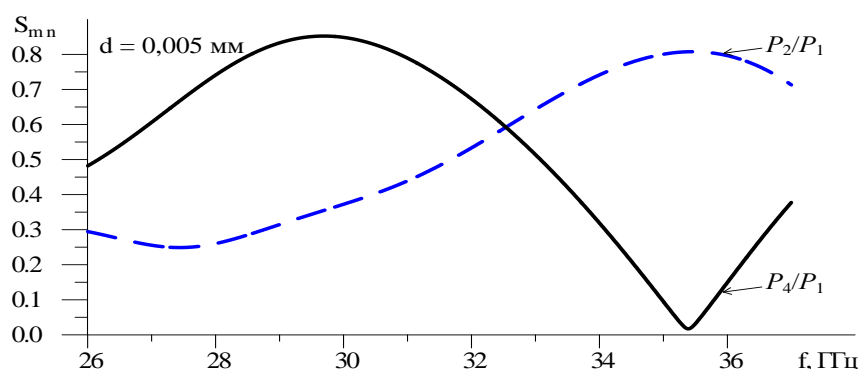
Рис. 2.12. Частотні залежності коефіцієнтів поширення для різних значень провідності діелектричного шару та за параметрів хвилеводної системи $a=1,8$ мм, $b=1$ мм: а) $\sigma=10^{-1}$ Cm/м; б) $\sigma=10^3$ Cm/м

За малих значень провідності на рівні $\sigma \approx 10^{-2} \div 10^{-1}$ Cm/м спостерігається погіршення частотних характеристик КСХВ. У цьому разі напівпровідниковий шар виконує функцію додаткового діелектричного хвилеводу з параметрами, відмінними від основного. З підвищенням провідності напівпровідника цей ефект слабшає.

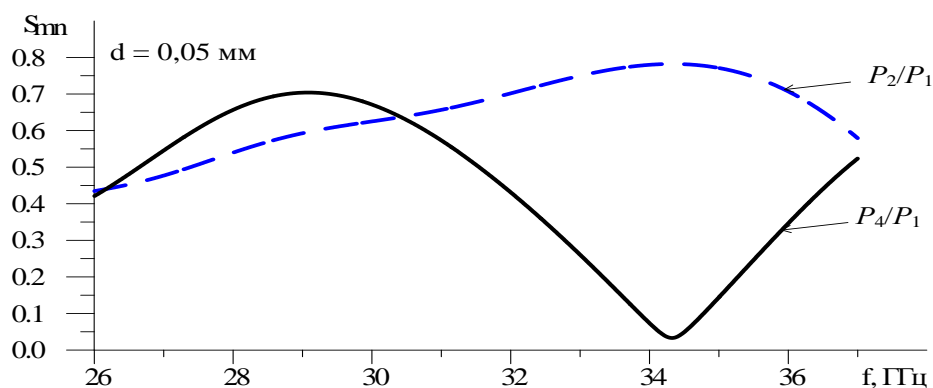
Крім цього, на хвилевідні властивості напівпровідникового шару, а отже і на характеристики досліджуваної системи загалом, впливає і його товщина. Так, на рис. 2.13. представлено частотні залежності коефіцієнтів поширення для трьох різних товщин напівпровідникового шару, отримані для двоххвилеводної системи з параметрами $a=1,8$ мм, $h=1$ мм і зі значенням провідності діелектричного шару при $\sigma=10^{-1}$ Cm/м.

При вирішенні питань узгодження напівпровідникового шару з основним хвилеводним трактом можлива реалізація електронного управління відгалуженою енергією під час пропускання через напівпровідниковий шар струму або опромінення його джерелами світла, зі спектральними параметрами, що відповідають ширині забороненої зони і рівням збудження.

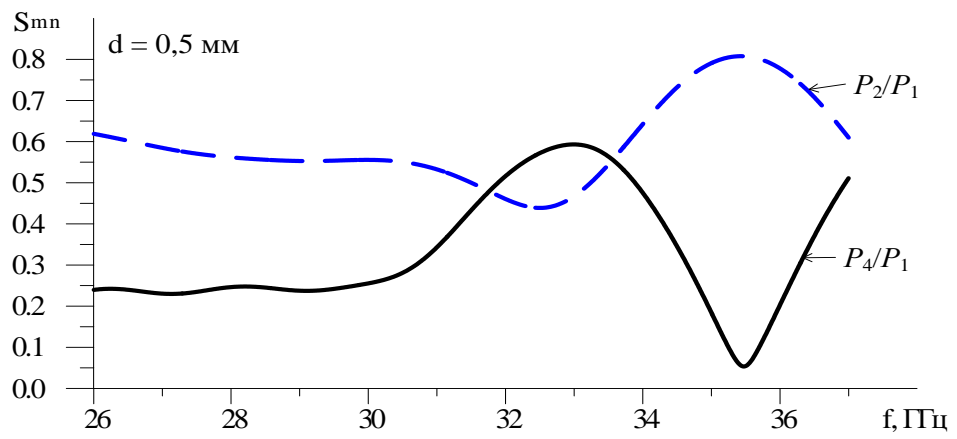
Результати експериментального моделювання хвильових процесів електродинамічної системи (рис. 2.2) з нижнім розташуванням екрана, що були отримані в аналогічному частотному діапазоні за допомогою панорамного вимірювального комплексу КСХ і ослаблення якісно корелюють з результатами чисельного моделювання [28]. Цей тип керування може бути корисним під час використання в схемах, виконаних за планарними технологіями.



а



б



В

Рис. 2.13. Частотні залежності коефіцієнтів поширення для трьох різних товщин напівпровідникового шару за $\sigma=10^{-1}$ Ом/м: а) $d=0,005$ мм; б) $d=0,05$ мм; в) $d=0,05$ мм

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА

ПІД ЧАС НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

У даному розділі "Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій" наводиться аналіз умов праці в дослідницькій лабораторії електротехнічного корпусу Сумського державного університету, оскільки там розташоване робоче місце, на якому проводилася робота на ноутбучі (розрахунки та комп'ютерне моделювання).

Приміщення лабораторії розташоване на першому поверсі адміністративної будівлі. Загальна площа приміщення становить 57,42 м², висота - 3,5 м, приміщення має чотири вікна.

У дослідницькій лабораторії перебуває 7 осіб, які займаються науковою діяльністю. Частина персоналу працює за ноутбуками, інша частина - на установках.

План приміщення наведено на рис. 3.1.

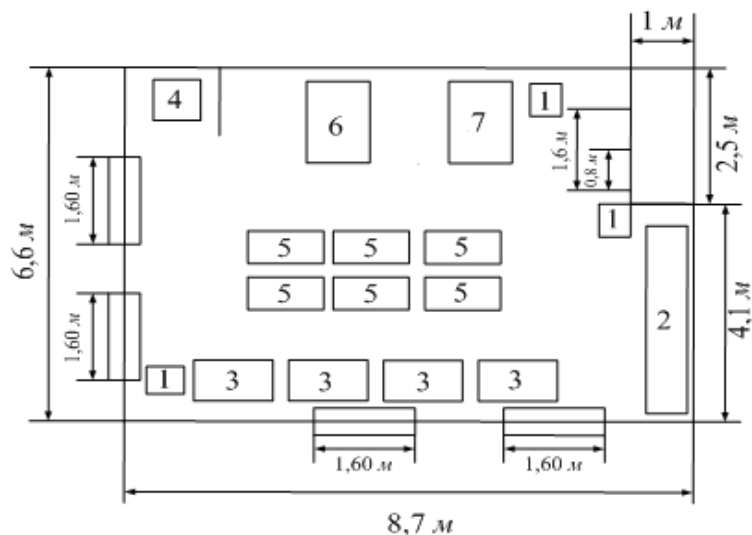


Рис. 3.1. План дослідницької лабораторії: 1 - сейф; 2 - шафа;
3 - монтажний стіл; 4 - рукомийник; 5 - письмовий стіл; 6 - установка генератора дифракційного випромінювання; 7 - установка "пучок"

У лабораторії розташовано 4 монтажні столи для проведення експериментів; також у приміщенні розміщено 6 письмових столів, одна шафа для одягу, 3 сейфи для зберігання інструментів і рукомийник для дотримання гігієни.

Освітлення лабораторії забезпечується чотирма вікнами розміром 1,6×2,0 м, штучне освітлення забезпечується люмінесцентними лампами в кількості 4 штуки по 40 Вт у 6 блоках.

Вентиляцію в лабораторії здійснюють шляхом провітрювання приміщення через вікна, тобто застосовується природна вентиляція.

3.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів під час роботи на ноутбуці

Під час роботи з ноутбуком або персональним комп'ютером на працівника можуть чинити несприятливий вплив такі небезпечні та шкідливі фактори:

- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- підвищений рівень іонізуючих випромінювань;
- можливість ураження статичною електрикою;
- підвищена або знижена іонізація повітря;
- підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може статися через тіло людини;
- мікроклімат (вологість, запиленість, температура і швидкість руху повітря, шум);
- нерівномірний розподіл яскравості в полі зору;
- статичні перевантаження кістково-м'язового апарату та динамічні локальні перевантаження м'язів кистей рук;
- перенапруження зорового аналізатора;
- емоційні перевантаження;

- монотонність праці.

Мікроклімат - стан внутрішнього середовища приміщення, який визначається температурою, вологістю, швидкістю руху повітря, що діють на організм людини, тощо.

Визначимо значення параметрів мікроклімату (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 - Значення параметрів мікроклімату.

| Параметр | Нормув. параметри | Нормативний документ |
|--|-------------------|------------------------|
| Освітлення: -штучне освітлення, лк -природне освітлення (значення КПО, %) | 300 1,5 | СНиП 11-4-79 |
| Температура повітря: - у зимку - в літку | 21-24 22-25 | ДСН 3.3.6.042 -99 |
| Відносна вологість, % | 40-60 | ДСН 3.3.6.042 - 99 |
| Швидкість руху повітря, м/с | 0,1-0,2 | ДСН 3.3.6.042 - 99 |
| Шум, дБ | 60 | ДСН 3.3.6.037 -99 [36] |

У приміщенні шуми непостійні.

Норми допустимих рівнів іонізації регламентуються документом ДНАОП 0.03-3.06-80 (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 - Норми допустимих рівнів іонізації.

| Рівні іонізації повітря | Кількість іонів в 1 см ³ | |
|-------------------------|-------------------------------------|----------------|
| | n ⁺ | n ⁻ |
| мінімально необхідний | 400 | 600 |
| оптимальний | 1500-3000 | 3000-5000 |
| максимально допустимий | 5000 | 5000 |

Навантаження на зір. Людське око реагує на найдрібнішу вібрацію тексту і на мерехтіння екрана. М'язи ока, що керують кристаликом, перебувають у постійній нарузі, що обов'язково призводить до втрати гостроти зору. Тривала робота за комп'ютером - це величезне навантаження на очі, оскільки зображення на моніторі складається не з безперервних ліній, як на папері, а з окремих точок, які світяться і мерехтять. У користувача неминуче погіршується зір, очі починають сльозитися, з'являється головний біль, втома, зображення двоїться і спотворюється.

Тривале сидяче положення призводить до напруження м'язів шиї, голови, рук і плечей, остеохондрозу. Остеохондроз виникає в разі порушення міжхребцевих дисків, яке призводить до випинання в якийсь бік (грижі міжхребцевого диска). Одна з поширених причин остеохондрозу - дистрофія м'язів спини. Ознаки захворювання, що починається: дискомфорт у спині та больові відчуття, головний біль, порушення роботи внутрішніх органів.

Перевантаження суглобів кистей рук призводить до такого явища, як синдром зап'ястного каналу.

Робота за комп'ютером є одним із чинників, що спричиняють стрес. Стресові ситуації та пов'язані з ними переживання спричиняють в організмі численні негативні зрушення.

3.2 Аналіз природного та штучного освітлення

Для оцінки ефективності природного освітлення в приміщенні необхідно порівняти значення фактичного освітлення і нормованого відносно СНиП II-4-79.

Нормоване значення коефіцієнта природної освітленості (КПО) для четвертого світлового поясу, у якому розташована Україна ($e_{\text{н}}^{\text{IV}}$, %) визначається за формулою:

$$e_{\text{н}}^{\text{IV}} = e_{\text{н}}^{\text{III}} \cdot m \cdot c, \quad (3.1)$$

де $e_{\text{н}}^{\text{III}}$ - нормоване значення КПО для III світлового поясу ($e_{\text{н}}^{\text{III}} = 2\%$ згідно зі СНиП II-4-79);

m - коефіцієнт світлового клімату (для України $m = 0,9$);

c - коефіцієнт сонячності клімату ($c = 0,8$).

Отримуємо, що:

$$e_{\text{н}}^{\text{III}} = 2 \cdot 0,9 \cdot 0,8 = 1,44\%$$

Для визначення достатності природного освітлення необхідно розрахувати фактичне значення КПО виходячи з формули:

$$e_{\text{ф}} = \frac{100 \cdot S_{\text{В}} \cdot \tau_3 \cdot r_1}{S_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot K_3 \cdot K_{\text{дом}}}, \quad (3.2)$$

де $S_{\text{В}}$ - площа всіх вікон у приміщенні, м^2 ;

$S_{\text{н}}$ - площа підлоги в приміщенні, м^2 ;

τ_3 - загальний коефіцієнт світлопропускання віконного отвору;

r_1 - коефіцієнт, що враховує відбиття світла від внутрішніх поверхонь приміщення;

η_B - світлова характеристика вікна;

$K_{\text{дом}}$ - коефіцієнт, що враховує затемнення вікон іншими будинками (будинків немає, $K_{\text{дом}} = 1$);

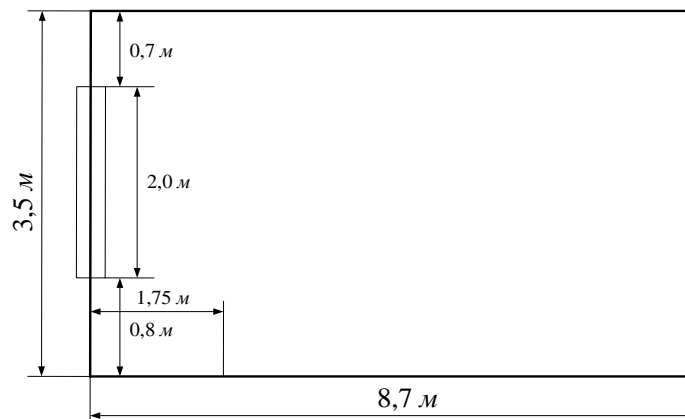
K_3 - коефіцієнт запасу ($K_3 = 1,4$).

Визначимо площу вікон і площу підлоги в приміщенні:

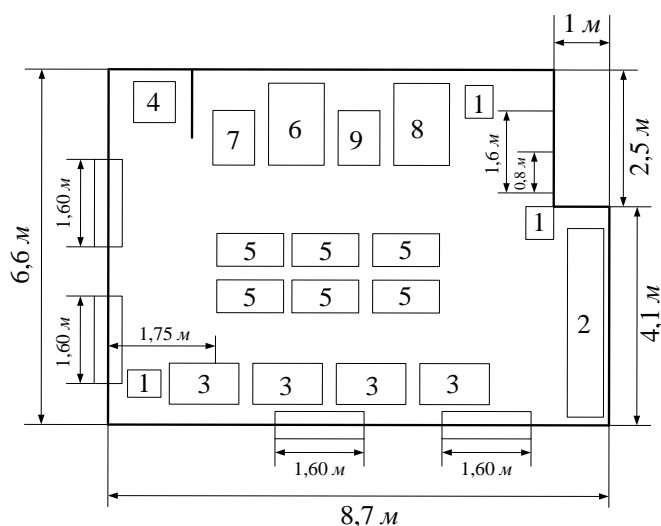
$$S_B = 1,6 \cdot 2,0 \cdot 4 = 12,8 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$S_h = (6,6 \cdot 8,7) - (1 \cdot 2,5) = 54,92 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Наведемо схему приміщення (рис. 3.2).



а



б

Рис. 3.2. Схема розрахунку природного освітлення: а - вид збоку; б - вид зверху

Для розрахунку коефіцієнта r_1 необхідно розрахувати такі параметри:

а) відношення глибини приміщення до висоти від рівня умовної робочої поверхні до верху вікна: $\frac{8,7}{2} = 4,35$;

б) відношення відстані до розрахункової точки від зовнішньої стіни до глибини приміщення: $\frac{1,75}{8,7} = 0,2$;

в) середньозважений коефіцієнт відбиття ρ стелі, стін, підлоги. Для світлих приміщень зі світлими меблями ρ можна орієнтовно взяти рівним 0,5, для темних - 0,3, для середніх між ними - 0,4. Для даної лабораторії: $\rho_{сз} = 0,4$;

г) відношення довжини приміщення до його глибини: $\frac{8,7}{6,6} = 1,3$.

Виходячи з розрахованих показників, з таблиці значень коефіцієнта r_1 за бічного одностороннього освітлення визначимо його значення за допомогою формули екстраполяції:

$$y(x) = y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \times (x_{i+1} - x), \quad (3.3)$$

де y_i - значення функції при i -му аргументі;

y_{i+1} - значення функції при $(i+1)$ -му аргументі;

$y(x)$ - значення функції за заданого аргументу, що міститься між значеннями аргументів x_i та x_{i+1} ;

x_i - i -е значення аргументу;

x_{i+1} - $(i+1)$ -е значення аргументу.

Звідси коефіцієнт r_1 :

$$r_1(1,3) = 1,3 + \frac{1,2 - 1,3}{2 - 1} (2 - 1,3) = 1,23.$$

Для визначення коефіцієнта η_B потрібно скористатися таблицею значень світлової характеристики η_B світлових прорізів за бічного освітлення:

$$\eta_B(1,3) = 21 + \frac{17 - 21}{1,5 - 1} \cdot (1,5 - 1,3) = 19,4;$$

$$\eta_B(1,3) = 23 + \frac{19 - 23}{1,5 - 1} \cdot (1,5 - 1,3) = 21,4;$$

$$\eta_B(4,35) = 19,4 + \frac{21,4 - 19,4}{5 - 4} \cdot (5 - 4,35) = 20,7.$$

Для віконних прорізів адміністративно-управлінських будівель, які не обладнані сонцезахисними пристроями, $\tau_z = 0,4 - 0,5$. Прийmemo $\tau_z = 0,4$. Оскільки будинків навпроти вікон немає, то $K_{\text{дом}} = 1$.

Тоді значення коефіцієнта природної освітленості становить:

$$e_{\phi} = \frac{100 \cdot 12,8 \cdot 0,4 \cdot 1,23}{54,92 \cdot 20,7 \cdot 1,4 \cdot 1} = 0,395\%.$$

Оскільки фактичне значення природного освітлення менше за нормоване ($0,395 < 1,44$), то природне освітлення в приміщенні недостатнє і необхідні заходи щодо його поліпшення.

Для оцінки ефективності штучного освітлення в приміщенні необхідно порівняти значення фактичного освітлення і нормованого значення згідно зі СНиП II-4-79.

Для освітлення приміщення застосовуються люмінесцентні лампи в кількості 4 штук по 40 Вт у 6 блоках. Система освітлення - загальна. Отже, нормоване значення освітлення при використанні люмінесцентних ламп - 300 лк (СНиП II-4-79).

Розрахуємо фактичне значення штучного освітлення (E_{ϕ}) з огляду на те, що потужність ламп - 40 Вт, кількість ламп у світильнику - 4 шт.

Розрахунок проведемо за формулою:

$$E_{\phi} = \frac{F_{\text{л}} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot N \cdot n}{S \cdot K \cdot Z}, \quad (3.4)$$

де $F_{\text{л}}$ - світловий потік лампи, лм (для люмінесцентних ламп потужністю 40 Вт - 2340 лм);

$\eta_{\text{в}}$ - коефіцієнт використання світлового потоку ($\eta_{\text{в}} = 0,4 - 0,6$);

N - кількість світильників, шт;

n - кількість ламп у світильнику, шт;

S - площа приміщення, m^2 ;

K - коефіцієнт запасу ($K = 1,5 - 2$);

Z - коефіцієнт нерівномірності освітлення ($Z = 1,1$).

Схему розміщення світильників у приміщенні наведено на рис. 3.3.

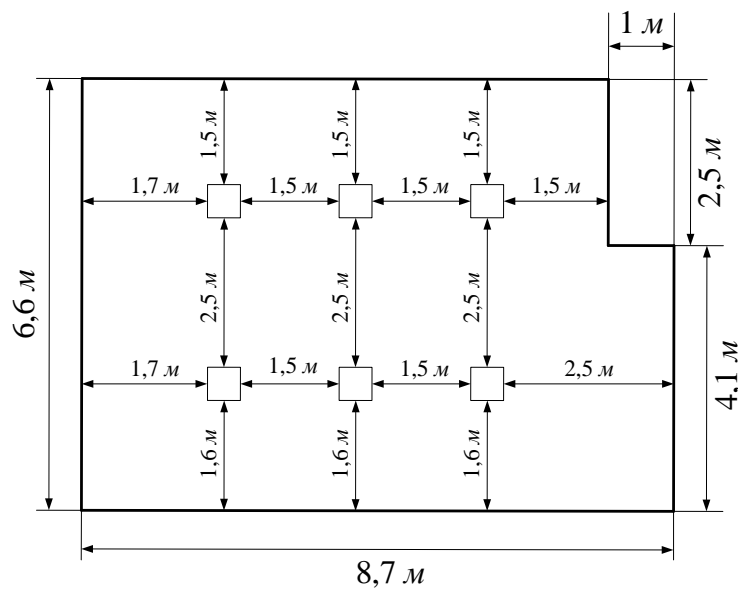


Рис. 3.3. Схема розміщення світильників

Прийmemo:

$$F_{\text{л}} = 2340 \text{ лм};$$

$$\eta_{\text{в}} = (0,4 + 0,6)/2 = 0,5;$$

$$N = 6 \text{ шт.};$$

$$n = 4 \text{ шт.};$$

$$S = (6,6 \cdot 8,7) - (1 \cdot 2,5) = 54,92 \text{ (м}^2\text{)};$$

$$K = 1,5;$$

$$Z = 1,1.$$

Отримуємо, що значення коефіцієнта штучного освітлення дорівнює:

$$E_{\phi} = \frac{2340 \cdot 0,5 \cdot 6 \cdot 4}{54,92 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 309,87 \text{ (лк)}.$$

Фактичне значення штучного освітлення $309,87 > 300$ лк, а це свідчить про достатність штучного освітлення в приміщенні.

3.3 Класифікація приміщень за вибухопожежною та пожежною безпекою

Методика визначення категорій приміщень і будинків за вибухопожежною та пожежною безпекою регламентується НАПБ Б.03.002-2007. За вибухопожежною безпекою приміщення і будівлі поділяють на п'ять категорій: А, Б - вибухопожежонебезпечні, В, Г, Д - пожежонебезпечні. Вибухопожежну та пожежну безпеку будівель і споруд оцінюють з урахуванням пожежо- та вибухонебезпечних властивостей і кількості речовин і матеріалів, що там перебувають.

Приміщення категорії А - це приміщення, в яких містяться (використовуються) такі речовини і матеріали: горючі гази, легкозаймісті рідини з температурою не більш як 28°C у такій кількості, що можуть утворювати вибухонебезпечні суміші. Речовини і матеріали, здатні вибухати і горіти під час взаємодії з водою, киснем повітря або одна з одною в такій кількості, що розрахунковий надлишковий тиск вибуху в приміщенні перевищує 5 кПа.

Категорія Б. Приміщення, де є горючий пил або волокна, легкозаймісті рідини з температурою спалаху понад 28°C . Горючі рідини в такій кількості, що

можуть утворювати вибухонебезпечні пилоповітряні або пароповітряні суміші, під час займання яких розвивається розрахунковий надлишковий тиск вибуху в приміщенні, що перевищує 6 кПа.

Категорія В. Приміщення, в яких перебувають горючі та важкогорючі рідини, тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали (у тому числі пил і волокна), речовини і матеріали, здатні під час взаємодії з водою, киснем повітря або одна з одною горіти за умови, що приміщення, в яких вони утримуються (використовуються), не належать до категорій А або Б.

Категорія Г. Негорючі речовини і матеріали в гарячому, розпеченому або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; також горючі гази, рідини, тверді речовини, що спалюються або утилізуються як паливо.

Категорія Д. Негорючі речовини та матеріали в холодному стані. До категорії Д відносяться приміщення, в яких у системах машин охолодження і гідроприводу є горючі речовини в кількостях не більше 60 кг в одиниці обладнання за тиску не вище 0,2 МПа, а також в яких є кабелі електропроводки до обладнання, окремі предмети меблів.

Встановлення категорії приміщення необхідно виконувати шляхом послідовної перевірки належності приміщення до категорій від повної (А) до нижчої (Д).

Пожежна безпека в дослідницькій лабораторії, що розглядається.

Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007 це приміщення за пожежною небезпекою належить до категорії "В". Тобто пожежонебезпечне, оскільки в лабораторії знаходяться тверді горючі речовини і матеріали (дерев'яні столи, пластмаса, папір).

Можливі причини виникнення пожежі в приміщенні: грубі порушення правил пожежної безпеки, несправність електропроводки.

Приміщення обладнане ручним вогнегасником ОУ-5 (1 шт.) як первинний засіб пожежогасіння.

У приміщенні виконуються всі вимоги з пожежної безпеки відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2004 "Правила пожежної безпеки в Україні".

У приміщенні також є план евакуації на випадок виникнення пожежі.

В аварійних (екстремальних) ситуаціях необхідно:

- у разі пошкодження обладнання, кабелів, проводів, несправності заземлення, появи запаху гару, виникнення незвичайного шуму та інших несправностей негайно відключити електроживлення обладнання і повідомити про те, що трапилося, безпосереднього керівника та особу, яка здійснює технічне обслуговування обладнання;

- при загорянні електропроводки, устаткування і тому подібних подіях відключити електроживлення і вжити заходів щодо гасіння пожежі за допомогою наявних первинних засобів пожежогасіння.

ВИСНОВОК

Засобом літературного дослідження проведено класифікацію пристроїв НВЧ діапазона, які використовують взаємний зв'язок між хвилеводними структурами.

Проведено чисельне моделювання теоретичної моделі екранованих діелектричних хвилеводів. Показано, що разом із загальновідомим способом керування інтенсивністю взаємного зв'язка між діелектричними хвилеводами засобом зміни їх взаємної відстані, можливо реалізувати керування перерозподілом енергії у такій системі використовуючи провідні екрани. Також з'ясовано, що у якості керуючого фактора можна використовувати не тільки відстань між екраном та діелектричним хвилеводом, а і розміри області екранування та провідність останнього.

В останньому розділі роботи "Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій" проведено аналіз небезпечних і шкідливих чинників під час роботи на ноутбучі, розраховано основні параметри природного та штучного освітлення дослідницької лабораторії, а також розглянуто питання пожежної безпеки цієї лабораторії та наведено загальну класифікацію приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Antenna Measurements at Millimeter and Submillimeter Wavelengths / A. V. Räsänen та ін. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62773-1_12
2. Very High Frequency (VHF) ESR/EPR. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4757-4379-1>.
3. Millimeter and submillimeter wave spectroscopy of propanal / O. Zingsheim et al. Journal of Molecular Spectroscopy. 2017. Vol. 342. P. 125–131. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jms.2017.07.008>.
4. О.П. Яненко, С. В. Михайленко Радіометричний модуляційний вимірювач інтенсивності оптичного випромінювання. *CORE – Aggregating the world's open access research papers*. URL: https://core.ac.uk/display/47225177?utm_source=pdf&utm_medium=banner&utm_campaign=pdf-decoration-v1.
5. Пристрої надвисоких частот. Конспект лекцій навч. посіб. за освітньою програмою «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія» / Д. О. Василенко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 182 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57059>
6. Luneburg R.K. The mathematical theory of optics. University of California press. 1964.
7. Lee, J.J. (1988). Lens Antennas. In: Lo, Y.T., Lee, S.W. (eds) Antenna Handbook. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6459-1_16
8. The element base on the basis of multi-coupled dielectric waveguides. *IEEE Xplore*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6959561>

9. G.S. Vorobjov, A.S. Krivets, V.O. Zhurba, Yu. A. Krutko, A.A. Rybalko. A quasioptical directional coupler on diffractioncoupled transmission lines, *Instruments and Experimental Techniques* , 2009, No 52 (4) , pp. 551-553
10. Basu D. K., Hartemann F. V. High-Field Electrodynamics. *Routledge & CRC Press*. URL: <https://www.routledge.com/High-Field-Electrodynamics/Hartemann/p/book/9780849323782>
11. Yan M., Thylén L., Qiu M. Layered metal-dielectric waveguide: subwavelength guidance, leveraged modulation sensitivity in mode index, and reversed mode ordering. *Optics Express*. 2011. Vol. 19, no. 4. P. 3818. URL: <https://doi.org/10.1364/oe.19.003818>
12. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль: навч. посіб. для студентів/ В. В. Пілінський. - К.: Національний технічний університет України «КПІ», 2014. - 336 с.
13. Спрямований відгалужувач на основі діелектричних хвилеводів - http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0551.html
14. Communications, Signal Processing, and Systems / L. Qilian et al. SpringerLink, 2021 URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-15-8411-4>
15. Double-layer geodesic and gradient-index lenses / Q. Chen et al. *Nature Communications*. 2022. Vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29587-9>
16. Planar Waveguides / Dr. Rüdiger Paschotta. RP Photonics Encyclopedia URL: https://www.rp-photonics.com/planar_waveguides.html
17. Ultrahigh Frequency (100 MHz–300 MHz) Ultrasonic Transducers for Optical Resolution Medical Imaging / C. Fei et al. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/srep28360>

18. Y. Zhang, Q. Wang and J. Ding, "A Cross-Guide Waveguide Directional Coupler With High Directivity and Broad Bandwidth," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 23, no. 11, pp. 581-583, Nov. 2013, doi: 10.1109/LMWC.2013.2281407
19. Mansuripur, M. (2009). Omni-directional dielectric mirrors. In *Classical Optics and its Applications* (pp. 274-288). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511803796.023
20. Воробйов Г.С. Режим спрямованого відгалуження потужності у дводзеркальному нерегулярному відкритому відкритому хвилеводі міліметрового діапазону / Г.С. Воробйов, В.О. Журба, М.В. Петровський, А.А. Рибалко, Ю.В. Шульга.
21. Cummings J. *Encyclopedia of Nanotechnology* Edited by Bharat Bhushan. *Encyclopedia of Nanotechnology*. Dordrecht and New York, NY: Springer 2012. , ISBN: 978-90-481-9750-7. *Reference Reviews*. 2013. Vol. 27, no. 4. P. 40–41. URL: <https://doi.org/10.1108/09504121311320189>
22. Paul D. L. Analysis of coupline in image guide tecnology / D. L. Paul, M. Habibi, Ph. Gelin, S. Tontain // *Microwave Theory Tech.* – May 1992. - Vol. 40, № 5. – p. 1025 - 1028.
23. Sirenko Yu. K. Modelirovanie I analizperekhodnyhprocessov v otkrytyhperiodicheskikh, volnovodnyh I kompaktnyhrezonatorah □ Modeling and analysis of transients in the open periodic, compact, and waveguide resonators□, Kharkov, Edena, 2003. 363 p.
24. Taflove A., Oskooi A., Johnson S. G. *Advances in FDTD Computational Electrodynamics*. *Google Books*. URL: <https://books.google.com.ua/books?id=ynRM33xslM8C&pg=PR5&ots=DkQdYhreso&dq=Computational%20electrodynamics&lr&hl=ru&pg=PR3#v=onepage&q=Computational%20electrodynamics&f=false>

25. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ. *Кафедра електромеханіки ФЕА*.
URL: https://em.fea.kpi.ua/images/doc_bak/Sylabus/PO/Sylabus_PO10.pdf
26. Voinigescu, S. High-frequency devices. In *High-Frequency Integrated Circuits (The Cambridge RF and Microwave Engineering Series*, pp. 142-317). 2013 Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139021128.005
27. Nefyodov, Eugene I., Smolskiy, Sergey M.. *Understanding of Electrodynamics, Radio Wave Propagation and Antennas*. N.p.: Scientific Research Publishing, Incorporated, 2013.
28. Vorobjov, G.S., Krivets, A.S., Zakaluzhny, I.N. The influence of metal screen upon electrodynamic parameters of connected dielectric waveguides. 2012, pp. 532-533.
29. Sidebottom, D. (2012). Scattering theory. In *Fundamentals of Condensed Matter and Crystalline Physics: An Introduction for Students of Physics and Materials Science* (pp. 69-81). Cambridge: Cambridge University Press.
doi:10.1017/CBO9781139062077.008