

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр, очної (денної) форми здобуття освіти

(назва освітнього ступеня)

на тему: Методика проектування хвильовідних фазоповертачів у НВЧ діапазоні

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РАм-61
спеціальності _____

172 “Електронні комунікації та радіотехніка”

(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	Опашний О.М. (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Паляниця Ю.Б. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Хвостівська Л.В. (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Дунець В.Л. (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Дунець В.Л.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« » грудня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр, очної (денної) форми здобуття освіти
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 “Електронні комунікації та радіотехніка”
(шифр і назва спеціальності)

студенту Опашному Олександру Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методика проєктування хвилевідних фазоповертачів у НВЧ діапазоні

Керівник роботи Паляниця Юрій Богданович, к.т.н., доцент

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

Затверджені наказом ректора від « 26 » листопада 2025 року № 4/7-1038

2. Термін подання студентом завершеної роботи 8 грудня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи частотний діапазон – X-band;
коефіцієнт стоячої хвилі (КСХн) в діапазоні частот (робоча смуга) – не більше 1,25;
кут повертання фазової складової електромагнітної хвилі сигналу – (90 – 180) град.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

I розділ. Аналітична частина.

II розділ. Основна частина.

III розділ. Науково – дослідна частина.

IV розділ. Охорона праці.

V розділ. Безпека в надзвичайних ситуаціях.

Висновки. Додатки.

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

Слайд 1. Назва кваліфікаційної роботи

Слайд 2. Огляд літератури, посилань, інтернет – файлів.

Слайд 3. Опис наукової новизни.

Слайд 4. Висновки.

Слайд 5. Технічні характеристики хвилевідного фазоповертача

Слайд 6. Опис методики проєктування.

Слайд 7. Математичне моделювання. Опис.

Слайд 8. Охорона праці. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Опис.

Слайд 9. Структурна схема вимірів технічних характеристик.

Слайд 10. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Підрозділ “Охорона праці”	к.т.н., зав. кафедри МТ Окіпний Ігор Богданович		
Підрозділ “Безпека в надзвичайних ситуаціях”	старший викладач кафедри ОХ Стручок Володимир Сергійович		

7. Дата видачі завдання 2 вересня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Збір інформації з доступних відкритих джерел за темою кваліфікаційної роботи.	вересень	
2.	Аналіз отриманої інформації	вересень - жовтень	
3.	Проведення розрахункових робіт за темою кваліфікаційної роботи	жовтень – листопад	
4.	Моделювання конструкції хвилевідного фазоповертача	жовтень – листопад	
5.	Проведення дослідницьких робіт з вимірів та аналізу технічних характеристик хвилевідного фазоповертача	листопад	
6.	Написання підрозділу з “Охорони праці”	листопад	
7.	Написання підрозділу з “Безпеки в надзвичайних ситуаціях”	листопад	
8.	Написання висновків кваліфікаційної роботи	листопад	
9.	Оформлення кваліфікаційної роботи в цілому	грудень	
10.	Створення презентаційних слайдів за темою кваліфікаційної роботи	грудень	
11.	Представлення кваліфікаційної роботи для перевірки на плагіат, фальсифікацію.	грудень	
12.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	грудень	
13.	Основний захист кваліфікаційної роботи	26 грудня 2025р.	

Студент

(підпис)

Опашний О.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Паляниця Ю.Б.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Опашний О.М. «Методика проектування хвилевідних фазоповертачів у НВЧ діапазоні». Кваліфікаційна робота магістра//Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, група РАМ-6,//Тернопіль, 2025. //с.-88, рис.-37, бібліог,-46 , додат.- 2.

Ключові слова: ХВИЛЕВІДНІ ФАЗОПОВЕРТАЧІ, НАДВИСОКІ ЧАСТОТИ, НВЧ-ДІАПАЗОН, ФАЗОВИЙ ЗСУВ, ХВИЛЕВІД, КОЕФІЦІЄНТ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ, С-ДІАПАЗОН, ЧАСТОТНИЙ ДІАПАЗОН, УЗГОДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ.

У роботі виконано дослідження хвилевідних фазоповертачів НВЧ-діапазону на основі аналізу існуючих аналогів, зокрема наукових публікацій, матеріалів конференцій, патентної документації та опублікованих результатів досліджень. Окрім цього, проведено власні експериментальні дослідження спроектованих фазоповертачів різних конструктивних варіантів. Також здійснено аналіз радіотехнічних характеристик хвилевідних фазоповертачів механічного та електромеханічного типів, а саме: коефіцієнта стоячої хвилі, робочого частотного діапазону та рівня динамічних втрат електромагнітних хвиль.

ANNOTATION

Opashny O.M. "Methodology of designing waveguide phase shifters in the microwave range". Master's qualification work // Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Group RAm-6, // Ternopil, 2025. // p.-88, fig.-37, bibliog.-46, appendix- 2.

Keywords: WAVEGUIDE PHASE SHIFTERS, ULTRA-HIGH FREQUENCIES, MICROWAVE RANGE, PHASE SHIFT, WAVEGUIDE, STANDING WAVE COEFFICIENT, C-BAND, FREQUENCY RANGE, LOAD MATCHING, ELECTROMAGNETIC WAVES.

The work has carried out a study of waveguide phase shifters in the microwave range based on the analysis of existing analogues, in particular scientific publications, conference materials, patent documentation and published research results. In addition, our own experimental studies of the designed phase shifters of various design options have been carried out. An analysis of the radio technical characteristics of waveguide phase shifters of mechanical and electromechanical types has also been carried out, namely: the standing wave coefficient, the operating frequency range and the level of dynamic losses of electromagnetic waves.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	
1.1 Основне призначення пристрою фазообертання.....	
1.2 Широкопasmовий фазообертач на основі хвильоводу.....	
1.3 Специфіка функціонування хвильоводного фазообертача.....	
1.4 Інтеграція фазообертача у прямокутний хвильовід.....	
1.5 Висновки до розділу 1.....	
РОЗДІЛ 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	
2.1 Конструктивні схеми коаксіально-хвильоводних переходів.....	
2.2 Структури фіксованих фазообертачів.....	
2.3 Фізичні процеси, що виникають у НВЧ-пристроях в умовах космічного середовища.....	
2.4 Методи аналізу та синтезу електродинамічних систем.....	
2.5 Висновки до розділу 2.....	
РОЗДІЛ 3 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	
3.1 Призначення, класифікація фазуючих пристроїв.....	
3.2 Хвильоводні фазообертачі, що використовують діелектричні пластини й металеві вставки.....	
3.3 Електронно-регульовані діодні фазообертачі у двох виконаннях — аналогові та дискретні.....	
3.4 Фазообертачі відбивного типу з дискретним керуванням.....	
3.5 НВЧ фазообертачі, реалізовані на феритових елементах.....	
3.6 Фазовий змішувач на 90 градусів а основі квадратного хвильоводу з діафрагмами.....	
3.7 Висновки до розділу 3.....	
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	
4.1 Вплив електромагнітних полів на організм людини	
4.2 Санітарно-захисна зона підприємства.....	

4.3 Оцінка впливу радіоактивного забруднення на технологічний процес виробництва і заходи захист.....	
4.4 Впровадження заходів запобігання або зменшення ступення ураження, своєчасне надання допомоги на об'єкті галузі.....	
4.5 Висновки до розділу 4.....	
ВИСНОВКИ.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	
ДОДАТКИ.....	
Додаток А Діапазони частот згідно класифікації IEEE.....	
Додаток Б Дослідження хвилевідних НВЧ структур з неоднорідностями у хвилеводах.....	

ВСТУП

Актуальність теми. Зростання обсягів переданої інформації зумовлює необхідність максимально раціонального використання наявних частотних ресурсів у широких та надшироких діапазонах роботи, а також застосування ортогональних лінійних і кругових поляризацій. Для ефективної реалізації цих можливостей у сучасних системах зв'язку на початкових етапах обробки сигналів (селекції за частотою та поляризацією) широко застосовуються фазоповертачі, що входять до складу хвилевідних антенних трактів. Їх використання дозволяє повніше задіяти робочий частотний спектр і різні типи поляризацій.

Модернізовані фазоповертачі знаходять застосування практично в усіх телекомунікаційних системах, зокрема в супутникових і радіорелейних цифрових комплексах передавання та приймання інформації.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є проєктування (адаптація до нових вимог) та дослідження технічних параметрів хвилевідних фазоповертачів НВЧ-діапазону, створених на основі прямокутних хвилеводів із використанням діелектричних фазозатримувальних елементів і регулювальних стрижнів для налаштування основних характеристик, зокрема фазової та групової швидкості електромагнітних хвиль.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- дослідити радіотехнічні параметри розроблених конструкцій фазоповертачів;
- визначити коефіцієнт стоячої хвилі за навантаженням у двох режимах функціонування;
- оцінити рівень динамічних втрат у фазоповертачі;
- перевірити коректність роботи пристрою при зміні положення діелектричної пластини;

- порівняти характеристики розробленого пристрою з відомими аналогами.

Об'єктом дослідження є широкосмугові хвилевідні механічні та механоелектричні фазоповертачі, вивчені на основі аналізу існуючих розробок і власних експериментів із проєктованими зразками.

Предметом дослідження є радіотехнічні характеристики хвилевідних фазоповертачів, зокрема коефіцієнт стоячої хвилі, робочий частотний діапазон і величина динамічних втрат електромагнітних хвиль.

Методи дослідження. Вимірювання параметрів фазоповертачів виконувалися відповідно до стандартних лабораторних методик із використанням спеціалізованих вимірювальних стендів. Окремо досліджувався вплив конструктивних параметрів, зокрема довжини регульовальних стрижнів і характеристик діелектричних вставок, на величину фазової затримки.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні та дослідженні нових конструктивних виконань механічних і механоелектричних фазоповертачів із фіксованими значеннями кута повороту електромагнітної хвилі.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено конструкції фазоповертачів, що забезпечують ефективне використання частотного ресурсу, зменшення коефіцієнта стоячої хвилі та рівня динамічних втрат, а також реалізацію повороту площини поляризації електромагнітної хвилі на 90° . Робочі частотні діапазони обрані відповідно до вимог Регламенту радіозв'язку, що дозволяє впровадження отриманих результатів у практичні системи зв'язку.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Основне призначення пристрою фазообертання

Фазообертач — це пристрій у складі тракту надвисоких частот, призначений для зміни фази електромагнітних сигналів. Його використовують у вимірjuвальних приладах, перетворювальних схемах і системах автоматики. Будова фазообертача залежить від робочого діапазону частот, допустимого інтервалу фазового зсуву та вимог до точності налаштування. В області радіочастот і низьких частот фазообертач зазвичай виконується у вигляді чотиріполюсника, що містить індуктивні, ємнісні та резистивні елементи [1].

Фазообертачі застосовують у системах з великою кількістю споживачів для правильного розподілу фаз між сигналами, а також у фідерних лініях радіосистем з метою компенсації різниці електричних довжин. Крім того, вони є важливими елементами фазованих антенних решіток, когерентних радіосистем та іншої апаратури надвисоких частот [2].

За принципом поширення хвиль фазообертачі поділяють на прохідні та відбивні. Залежно від фізичного принципу дії вони бувають механічними, електромеханічними й електричними. За характером регулювання розрізняють пристрої з дискретною або плавною зміною фази.

Найпростіший фазообертач реалізується у вигляді ланцюга з котушкою індуктивності та резистором або з конденсатором і резистором, що забезпечує фазовий зсув у межах $0\text{--}90^\circ$. Складніші схеми виконують у вигляді мостових кіл із конденсатором та кількома резисторами, що дає можливість змінювати фазу від 0 до 180° .

У лампових і транзисторних схемах часто застосовують фазоінвертори з розділеним навантаженням, які створюють зсув фази на 180° . Загалом фазовий кут у таких пристроях залежить від частоти сигналу, і лише в системах із

автоматичним підлаштуванням параметри змінюються так, щоб мінімізувати відхилення від заданого значення.

У мережах змінного струму промислової частоти для регулювання фази використовують обертові трансформатори, сельсини та трифазні асинхронні двигуни з загальмованим ротором. У короткохвильовому та дециметровому діапазонах фазообертачі виготовляють на основі хвилеводів і відрізків коаксіальних ліній. Точність установлення фази залежить від типу пристрою: в електронних вона становить приблизно $0,05\text{--}0,1^\circ$, а в електромеханічних — $0,5\text{--}1^\circ$.

У надвисокочастотних фазообертачах зміна фази відбувається на виході хвилевідної або полоскової лінії завдяки варіюванню її електричної довжини. За цим принципом пристрої поділяють на регульовані та нерегульовані.

Регульований фазообертач — це ділянка фідера, що створює необхідний фазовий зсув у заданому діапазоні частот і може налаштовуватися за потреби. До таких пристроїв належать розсувні секції коаксіальних ліній, хвилевідні відрізки, стискні секції та мостові фазообертачі [3].

Наприклад, коаксіальна розсувна секція дозволяє змінювати фазу шляхом регулювання довжини лінії, а хвилевідний діелектричний фазообертач — за рахунок переміщення діелектричної вставки, що впливає на швидкість поширення хвилі. У стискних секціях фазовий зсув досягається зміною ширини хвилеводу, а мостові пристрої містять кілька плечей і два короткозамкнені шлейфи змінної довжини.

Серед фазообертачів з електричним керуванням вирізняють пристрої на основі феритів, напівпровідників, діелектриків, плазми й сегнетоелектриків. Феритові фазообертачі працюють завдяки взаємодії магнітних моментів із електромагнітним полем. Взаємні феритові пристрої забезпечують однаковий фазовий зсув у всіх напрямках поширення хвиль, тоді як невзаємні належать до класу гіраторів.

Фазообертачі на напівпровідникових елементах реалізують за допомогою варикапів або діодів типу р-і-п, які виконують роль комутаторів. Зміна фази відбувається плавно — за рахунок керування параметрами елементів або підключення до лінії додаткових шлейфів [2].

Нерегульований фазообертач — це залібрований відрізок фідера, у якому потрібний фазовий зсув досягається шляхом точного вибору його довжини, геометричних розмірів або діелектричних властивостей матеріалів.

1.2. Широкосмуговий фазообертач на основі хвилеводу

Цей винахід належить до галузі хвилевідних фазоперетворювачів, а саме до фазообертачів зі складною структурою, побудованою на комбінації послідовно та паралельно розміщених ємнісних елементів, призначених для компенсації частотної дисперсії.

Хвильові фазообертачі широко застосовуються у НВЧ-схемах для зміни фази електромагнітного сигналу в одній ділянці тракту відносно іншої. Для коректної роботи багатьох схем необхідний точний фазовий зсув, наприклад 90° або інше задане значення. Однією з основних вимог до таких пристроїв є стабільність фазового зсуву в заданому діапазоні частот. За умов відносно вузької робочої смуги відомі фазообертачі здатні забезпечити необхідну точність зсуву фази в усьому робочому діапазоні [4].

Запропонований винахід ґрунтується на використанні послідовних і паралельних ємнісних елементів, кожен з яких вносить власний внесок у фазовий зсув. Послідовні елементи створюють фазову характеристику, що змінюється з частотою відповідно до власної дисперсії. Аналогічно, паралельні елементи також формують частотно залежний зсув фази, але з протилежною тенденцією. За рахунок правильного добору геометричних розмірів та взаємного розташування цих елементів їхні дисперсійні впливи взаємно компенсуються, що дозволяє досягти майже незалежного від частоти фазового

зсуву. Завдяки цьому фазообертач може ефективно працювати в широкому діапазоні частот.

Згідно з рис. 1.1, 1.2 і 1.3 показано фазообертач 10, призначений для передачі електромагнітної енергії. Пристрій розміщений у прямокутному хвилеводі 12, утвореному двома широкими стінками — верхньою 14 і нижньою 16, з'єднаними боковими стінками 18. Хвилевід підтримує поперечно-електричну хвилю, електричне поле якої орієнтоване паралельно коротким стінкам.

Фазообертач є взаємним пристроєм, тобто передача сигналу можлива в обох напрямках уздовж осі хвилеводу, з виходом на протилежному кінці. Конструкція виконана з електропровідного матеріалу, зокрема з латуні або алюмінію, для забезпечення належної провідності стінок.

Відповідно до запропонованої конструкції, фазообертач містить верхній фазозсувний елемент 20, розташований на внутрішній поверхні верхньої стінки, і нижній фазозсувний елемент 22, змонтований на внутрішній поверхні нижньої стінки. Верхній елемент сформований дев'ятьма виступами 24, що простягаються від верхньої стінки приблизно до середини хвилеводу. Нижній елемент утворений поздовжнім гребенем 26, який висувається від нижньої стінки до половини висоти хвилеводу.

Виступи 24 і гребінь 26 розташовані один проти одного по різні боки хвилеводу, орієнтовані паралельно його осі та центрові лінії широких стінок.

Кожен виступ створює фазовий зсув близько -5° , у сумі дев'ять виступів забезпечують приблизно -45° . Гребінь 26 також формує фазовий зсув орієнтовно -45° . При цьому внесок виступів зростає зі збільшенням частоти, а внесок гребеня — навпаки зменшується. Швидкість наростання фазового зсуву, викликаного виступами, дорівнює швидкості зменшення зсуву, створюваного гребенем [15].

У результаті сумарний фазовий зсув залишається практично сталим і наближається до -90° у всьому робочому частотному діапазоні фазообертача. В

оптимальному виконанні пристрій забезпечує стабільну роботу в діапазоні від 11 до 15 ГГц, суттєво розширюючи смугу робочих частот.

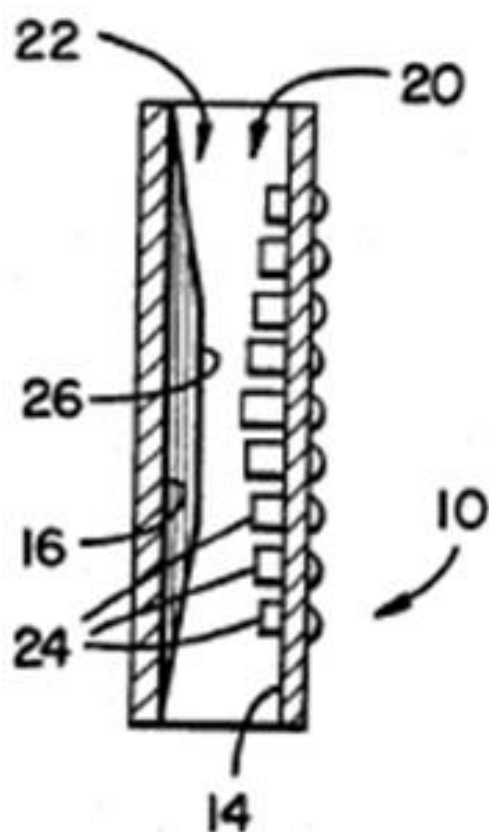


Рис. 1.1. Вигляд збоку фазообертача в розріз по лінії

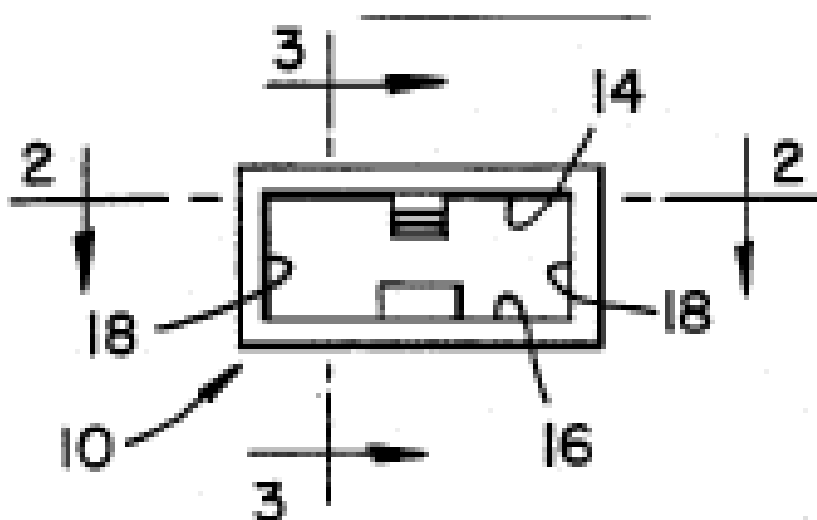


Рис. 1.2. Вид з торця хвилеводу

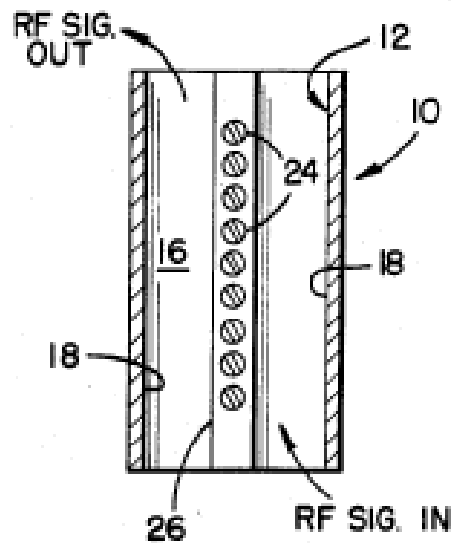


Рис. 1.3. Вид зверху в розріз по лінії

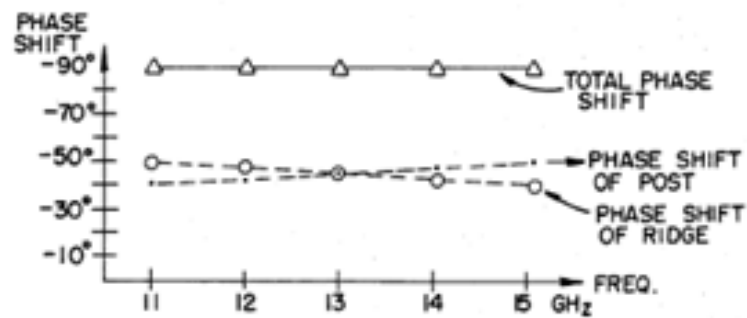


Рис. 1.4. Графічне представлення частотних дисперсійних властивостей елементів фазообертання у послідовному та паралельному виконанні

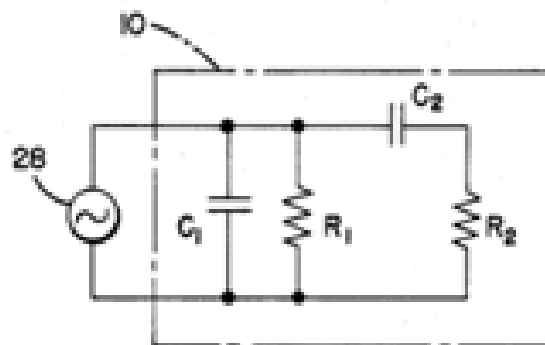


Рис. 1.5. Схема, що пояснює роботу фазообертача з елементами, з'єднаними паралельно та послідовно

1.3. Специфіка функціонування хвильового фазообертача

Пристрій призначений для створення диференційного фазового зсуву між взаємно перпендикулярними складовими лінійно поляризованих сигналів, при цьому різниця фаз залишається практично сталою в широкому частотному діапазоні, зокрема в межах від 5,925 до 6,425 ГГц.

Фазообертач містить секції хвильоводу, на внутрішніх поверхнях яких у першій робочій площині розміщено два протилежні ряди штифтів, а в другій площині, перпендикулярній до першої, — дві взаємно розташовані гребінчасті структури. Завдяки спеціально підібраній геометрії та взаємному розташуванню штифтів і гребенів забезпечується практично незмінний сумарний фазовий зсув φ_p у межах заданої смуги пропускання [16].

Величина φ_p може бути визначена або наближено обчислена відповідно до конструктивних параметрів пристрою.

$$A_0 - B_0 + (A_1 - B_1)(f - f_0) + (A_2 - B_2)(f - f_0)^2, \quad (1.1)$$

де f — це вибрана робоча частота ортогонально поляризованих сигналів, а F — їх частота налагодження (центральна частота). Смуга пропускання поляризатора описується коефіцієнтами A_0 , A_1 , A_2 , які залежать від характеристик двох рядів штифтів поляризаційного елемента, а також коефіцієнтами B_0 , B_1 , B_2 , що визначаються параметрами двох гребенів поляризатора.

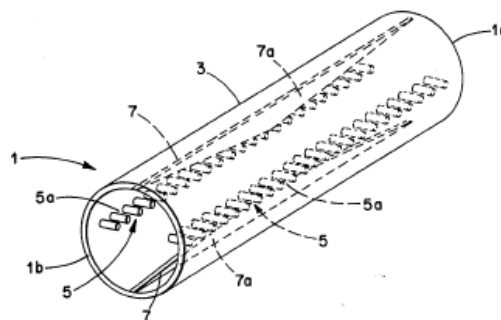


Рис. 1.6. Криві фазового зсуву φ_p від частоти f для штирьового поляризатора

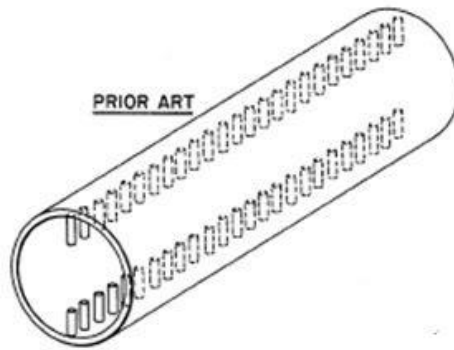


Рис. 1.7. Крива фазового зсуву φ_g від частоти f для фазообертача;

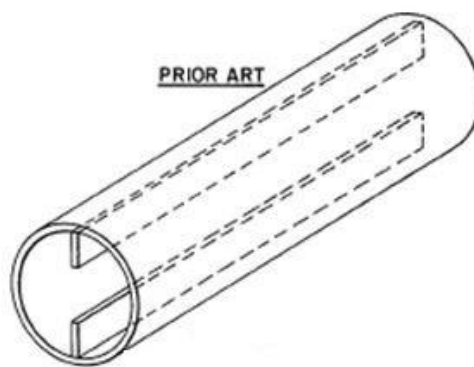


Рис. 1.8. Перспективний вид прототипу фазообертача

1.4. Інтеграція фазообертача у прямокутний хвилевід

Запропонований винахід належить до галузі радіотехніки та спрямований на покращення узгодження і скорочення довжини ступінчастих секцій конструкції. Хвилевідний фазообертач виконаний у вигляді відрізка прямокутного хвилеводу (ПХ) 1, усередині якого вздовж вузьких стінок 2 розташована діелектрична пластина (ДП) 3 ступінчастої форми.

Діелектрична пластина 3 переміщується поперек осі хвилеводу за допомогою механізму переміщення 4. Її уступи зміщені відносно один одного у поздовжньому напрямку в одному й тому самому напрямі та мають довжину не меншу ніж 0,9 максимальної робочої довжини хвилі в хвилеводі.

Особливістю даного фазообертача є те, що сходинок мають задану протяжність і змінну висоту по довжині, яка описується законом квадратичної синусоїди та зменшується до мінімальних значень на краях. Завдяки такій формі пластини досягається краще узгодження пристрою [17].

Найбільший фазовий зсув виникає тоді, коли діелектрична пластина розташована по центру хвилеводу, а найменший — коли вона знаходиться біля вузької стінки (див. рис. 1.9).

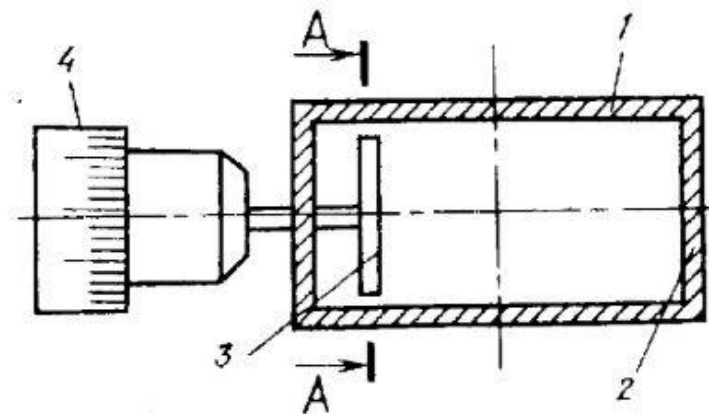


Рис. 1.9. Хвильоводний фазообертач, поперечний переріз;

Хвильовідний фазообертач складається з відрізка 1 прямокутного хвилеводу, у внутрішньому просторі якого вздовж вузьких стінок 2 розміщена діелектрична пластина 3 ступінчастої конфігурації з заданими довжиною та висотою h . Пластина встановлена з можливістю переміщення в напрямку, перпендикулярному осі хвилеводу, наприклад за допомогою механізму переміщення 4.

Сходинок 5 діелектричної пластини розташовані зі зміщенням одна відносно одної уздовж осі хвилеводу в одному напрямку на відстань L_i , де i — номер окремої сходинок. Кожен ступінь має змінну по довжині висоту h , яка змінюється згідно із законом квадратичної синусоїди та набуває мінімального значення на краях. Довжина S кожної сходинок становить не менше ніж 0,9 максимальної робочої довжини хвилі у хвилеводі.

Робота хвилевідного фазообертача полягає у такому [18].

Фазовий зсув регулюється шляхом поперечного переміщення діелектричної пластини 3 механізмом 4. Найбільший фазовий зсув досягається при розташуванні пластини у центральній частині хвилеводу, а найменший — коли вона знаходиться біля вузької стінки.

Завдяки виконанню кожної сходинки зі змінною по довжині висотою, що відповідає квадратичній синусоїдальній залежності, та за умови, що довжина сходинки дорівнює періоду цієї функції й становить не менше 0,9 максимальної робочої довжини хвилі, досягається покращення узгодження та скорочення загальної довжини ступінчастої структури.

Якщо кількість сходинок m перевищує одиницю, механічна жорсткість діелектричної пластини забезпечується або з'єднанням сходинок по основі, або розворотом половини однієї з них на 180° відносно поздовжньої осі.

За наявності на поверхні діелектричної пластини резистивного шару пристрій виконує функцію хвилевідного атенюатора з належним узгодженням у робочому частотному діапазоні.

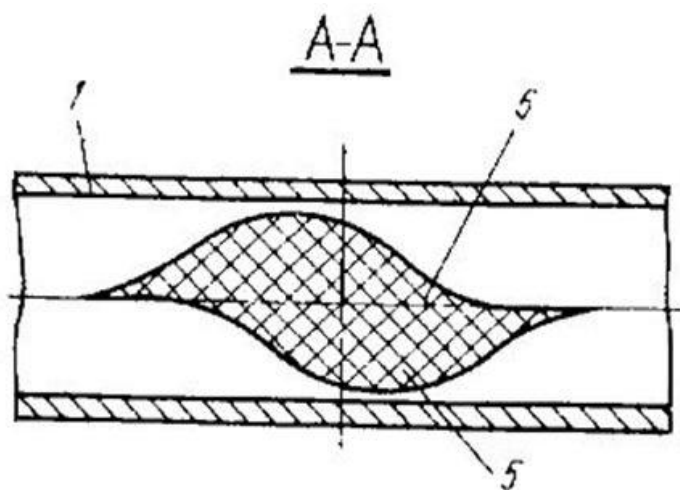


Рис. 1.10. Розріз А-А хвилеводного фазообертача

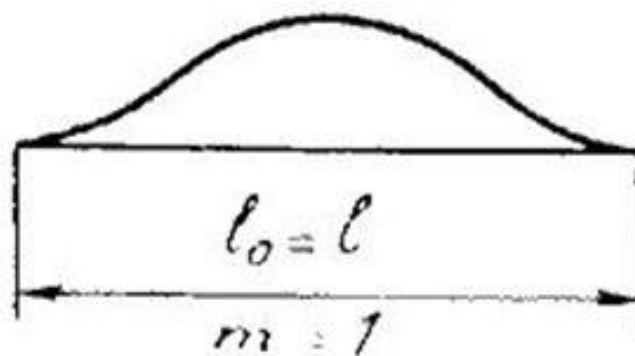


Рис. 1.11. Діелектрична пластина з однією сходинкою хвильоводного фазообертача

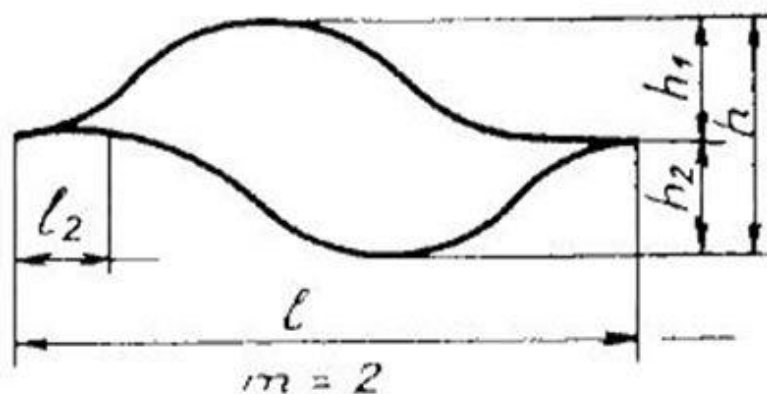


Рис. 1.12. Діелектрична пластина з двома сходинками хвильоводного фазообертача

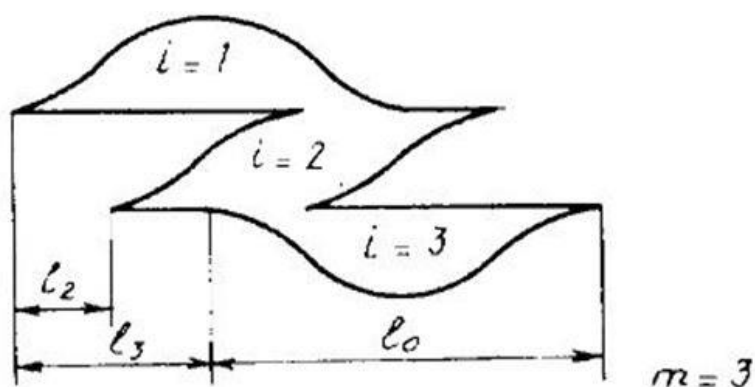


Рис. 1.13. Діелектрична пластина з трьома сходинками хвильоводного фазообертача

1.5. Висновки до розділу 1

У першому розділі виконано огляд і аналіз широкосмугових фазообертачів на підставі вивчення вже існуючих рішень, зокрема наукових публікацій, матеріалів конференцій, патентів і експериментальних результатів, а також узагальнення сучасних досліджень у цій галузі.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1. Конструктивні схеми коаксіально-хвильоводних переходів

Коаксіально-хвильоводні переходи застосовуються для з'єднання та узгодження хвильоводних і коаксіальних трактів передавання сигналів. Під час їх конструювання основну увагу приділяють зниженню втрат і забезпеченню малих значень коефіцієнта стоячої хвилі в робочому частотному діапазоні. Також важливими є вимоги до стабільної роботи в умовах механічних і температурних впливів, мінімальних масо-габаритних характеристик і технологічної придатності виробу. Для пристроїв, що працюють при підвищених рівнях потужності, конструкція повинна запобігати виникненню газового пробоя та ефекту мультипактора [19].

Типова структура переходу містить хвильоводний порт, ділянку хвильоводу, узгоджувальний вузол, відрізок коаксіальної лінії та коаксіальний роз'єм. Узгоджувальна зона відіграє роль резонатора з малою добротністю, з яким електромагнітно пов'язані обидва порти. Широкосмугова робота переходу досягається завдяки сильному електромагнітному зв'язку узгоджувальної області з портами. Для коаксіального тракту характер зв'язку може бути ємнісним або індуктивним залежно від конструктивного виконання. При цьому зчленовані ЛП можуть розташовуватися або під прямим кутом (Рис. 2.1 а), або співвісно (Рис. 2.1 б).

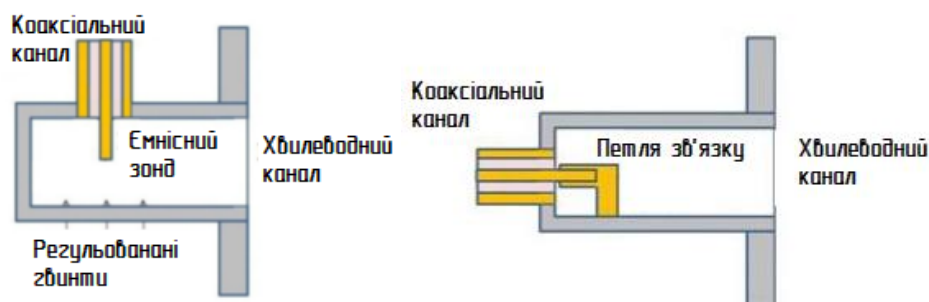


Рис. 2.1. Коаксіально-хвильоводні переходи ємнісного (а) та індуктивного (б) типів

Найпростішим методом збудження хвилі H_{10} у прямокутному хвилеводі є введення зонда всередину хвилевода через широку стінку паралельно до вузької. Покращення узгодження такого коаксіально-хвилеводного переходу можливе шляхом застосування ступінчастої коаксіальної лінії передачі, а також завдяки використанню різноманітних регулювальних елементів, зокрема штифтів, гвинтів тощо [15].

До основних недоліків зондової конструкції належать низька електрична міцність, зумовлена локальною концентрацією електричного поля між зондом і протилежною стінкою хвилевода, а також обмежена смуга узгодження. Загалом деяке розширення робочого частотного діапазону можливе за умови оптимального розміщення зонда відносно центра широкої стінки хвилевода. Проте навіть у такому разі збільшення діапазону частот зазвичай не перевищує 10–15 %.

Подальшим розвитком зондових структур стали технічні рішення, у яких для розширення смуги пропускання та зменшення фазових спотворень запропоновано застосування рухомої діелектричної гайки на діелектричній втулці, розташованій уздовж осі зонда. Також відомі конструкції з конічними діелектричними втулками. Окрім того, запропоновано повне заповнення хвилеводного каналу переходу діелектричним матеріалом, що дозволяє спростити процес складання і налагодження, а також зменшити значення коефіцієнта стоячої хвилі.

Ще одне вдосконалення зондової конструкції запропоновано в роботі [20], де узгоджувальний пристрій доповнюється відрізком заграничного хвилевода, співвісного із зондом і заповненого спеціальним поглинальним матеріалом, призначеним для пригнічення небажаних гармонік [20].

Збільшити смугу узгодження приблизно вдвічі порівняно з конструкцією, наведеною на рисунку 2.1, а, вдасться шляхом використання переходу з діелектричною опорою у вигляді втулки, всередині якої розміщено зонд. Таке конструктивне рішення одночасно забезпечує підвищення електричної та механічної міцності пристрою.

Одним зі способів розширення робочої смуги частот зондових коаксіально-хвильоводних переходів є введення додаткового циліндричного елемента, який є продовженням зонда, але має більший діаметр. Перевагами такого рішення є конструктивна простота, відсутність діелектричних матеріалів у зоні електромагнітного зв'язку, малі габарити та висока технологічність виготовлення. Залежно від особливостей виробництва корпус переходу може виготовлятися як у вигляді однієї, так і двох деталей. Недоліком є обмежена механічна й електрична міцність елемента зв'язку.

Відомі також варіанти коаксіально-хвильоводних переходів із елементами зв'язку сферичної та напівсферичної форми. Такі конструкції доцільно застосовувати за високих рівнів потужності, оскільки вони знижують імовірність газового пробою. Зокрема, у роботі досліджено широкосмуговий перехід Ку-діапазону (12,0–18,5 ГГц), реалізований на основі напівсферичного елемента зв'язку з двома регульовальними гвинтами. Оптимізована конструкція характеризується зворотними втратами не гірше ніж –25 дБ у всьому робочому діапазоні хвильовода.

Пошуку оптимальної геометрії зонда присвячено роботу. У результаті параметричної оптимізації сферичної структури, яку автори назвали «суперформою», встановлено, що найкращі частотні характеристики забезпечує зонд каплеподібної форми. Так, для переходу, призначеного для хвильовода WR90, коефіцієнт відбиття не перевищував –15 дБ у діапазоні частот 7,5–15,0 ГГц. Оцінювання електричної міцності спроектованого переходу здійснювалося шляхом порівняння максимальних значень напруженості електричного поля в хвильоводному каналі поблизу зонда з довідковими даними щодо електричної стійкості повітря [22].

У роботі наведено також дослідження, присвячене пошуку оптимальної геометрії зонда за допомогою генетичного алгоритму параметричної оптимізації. Зонд було реалізовано у вигляді друкованого провідника на діелектричній підкладці, розміщеній у хвильоводному каналі переходу. В результаті встановлено, що найефективнішою є форма, близька до колової.

Крім того, у якості елементів електромагнітного зв'язку застосовують циліндри зі ступінчастою зміною діаметра, а також конічні елементи. Відомі конструкції, у яких конічні зонди розміщені в діелектричному середовищі, що частково заповнює хвильоводний канал.

Хвильоводи складної форми широко використовуються як узгоджувальні та перехідні елементи в коаксіально-хвильоводних переходах як кутового, так і співвісного типів. При цьому внутрішня форма каналу може мати ступінчасту або плавну геометрію. Зокрема, у роботах описано два варіанти кутових широкосмугових переходів Х-діапазону (8,0–12,0 ГГц) і Ku-діапазону (12,0–18,0 ГГц) із $K_{СХН} < 1,2$. Їхня конструкція містить металеве ребро, діелектричну втулку та циліндричний елемент на кінці зонда, що забезпечує розширення робочої смуги частот.

Ефективний спосіб реалізації зондових переходів для хвильоводів зі зменшеною висотою наведено в роботі. Він передбачає формування узгоджувальної порожнини більшої висоти, ніж основний хвильовод, у якій розміщується циліндричний елемент зв'язку. У цій же роботі зазначено, що узгодження можна покращити шляхом зміщення осі коаксіальної лінії передачі відносно центра широкої стінки хвильовода. Проте чисельне моделювання та параметрична оптимізація, подані в [24], продемонстрували, що високий рівень узгодження досягається і за симетричного розміщення осі коаксіальної лінії. Подальший розвиток цієї структури представлено в [25], де запропоновано плавний перехід між узгоджувальною порожниною та основним хвильоводом. Таке рішення зменшує пікову напруженість електричного поля та підвищує стійкість пристрою до НВЧ-розрядів.

Співвісні переходи з ємнісним типом зв'язку досліджені значно меншою мірою. Відомі конструкції на основі короткозамкнутого відрізка прямокутного хвильовода, до якого з одного боку приєднано стандартний хвильовод, а з іншого введено центральний провідник коаксіального роз'єму. Хвильовий опір узгоджувальної ділянки в таких структурах перевищує опір основного хвильовода.

Існують також компактні співвісні конструкції переходів з ємнісним зв'язком, що містять узгоджувальну порожнину та прямокутний виступ у хвильоводному каналі. У роботі [28] застосовано два виступи, що формують П-подібний хвилевід, завдяки чому вдалося досягти коефіцієнта відбиття не гірше -20 дБ у діапазоні $9,5\text{--}11,0$ ГГц. Однак завдання розширення робочої смуги частот до повного робочого діапазону прямокутного хвильовода залишається актуальним.

Ще однією поширеною групою є переходи з індуктивним типом зв'язку, в яких центральний провідник коаксіального роз'єму електрично з'єднаний із корпусом хвильовода. Це дозволяє реалізовувати конструкції з повітряним заповненням без застосування твердих діелектриків, що знижує ймовірність пробоя і підвищує надійність за високих потужностей.

Найпростішою реалізацією індуктивного переходу є металева петля, розміщена в короткозамкнутій ділянці хвильовода. Один кінець петлі з'єднується з центральним провідником коаксіальної лінії, інший — з корпусом хвильовода.

Перевагою таких переходів є простота конструкції та можливість виготовлення на стандартному фрезерному обладнанні. Проте петльовий елемент забезпечує лише вузьку смугу узгодження. У широкосмугових реалізаціях частотні характеристики залишаються незадовільними. Наприклад, у роботі [33] для діапазону $7,5\text{--}10,5$ ГГц КСХН досягало значення $2,0$.

Навіть застосування методів чисельного моделювання та оптимізації не дозволяє істотно розширити смугу частот для переходів на основі металевої петлі. Так, у [34] для хвильовода WR90 відносна ширина смуги за критерієм $S_{11} < -20$ дБ виявилась меншою за 2% . При цьому аналізувалось лише співвісне розташування портів. У той же час результати [22, 25] свідчать, що зміщення коаксіального порту дозволяє підвищити ширину смуги до $10\text{--}15\%$.

Подібні структури описані в [26, 27], де застосовано додатковий провідник, що виконує функцію узгоджувального шлейфа. Проте й у цьому випадку смуга частот не перевищує 2% . Відомі також індуктивні переходи з Т-

подібними та гудзикоподібними елементами зв'язку, однак вони не мають істотних переваг і залишаються вузькосмуговими.

Суттєве розширення робочого діапазону досягається в конструкціях зі складною формою елемента зв'язку. Принцип їхньої роботи ґрунтується на послідовному перетворенні основної хвилі H_{10} прямокутного хвилевода в хвилю реберного хвилевода, а далі — в ТЕМ-хвилю коаксіальної лінії. Це досягається за допомогою плавних або ступінчастих переходів між хвилеводними структурами, а також додаткових налаштовувальних елементів.

Найпростішою конструкцією на основі реберного хвилевода є одноступенева вузькосмугова схема, яка відзначається високою електричною міцністю за малих габаритів.

Широкосмугові переходи створюють шляхом з'єднання кількох відрізків реберних хвилеводів П- та Н-подібного профілю з різними хвильовими опорами та довжинами, близькими до чверті довжини хвилі. Важливу роль відіграє вузол узгодження між реберним і коаксіальним хвилеводами, сформований зазором між короткозамикальним елементом і ділянкою хвилевода.

У ранніх роботах синтез таких переходів ґрунтувався на аналітичних моделях узгоджувальних трансформаторів, побудованих із касадно з'єднаних відрізків ліній із монотонною зміною хвильових опорів. Нині ці моделі застосовуються переважно як початкове наближення для чисельної оптимізації.

Існують також трансформатори зі складнішою структурою, у яких хвильовий опір змінюється немонотонно.

Отже, на сьогодні досліджено велику кількість варіантів узгоджувальних структур та механізмів перетворення хвиль. Разом з тим електродинамічні структури, у яких з'єднання ліній передачі здійснюється через вузьку стінку хвилевода, залишаються практично недослідженими. Крім того, в більшості робіт відсутній системний аналіз електричної міцності та використання еквівалентних схем під час проєктування.

2.2. Структури фіксованих фазообертачів

Фіксовані фазообертачі на лініях передачі з розподіленими параметрами належать до пасивних пристроїв, які в заданій робочій смузі частот формують сталий фазовий зсув між сигналами на виходах опорного та фазозсувного каналів. Для забезпечення широкосмугових властивостей фазообертач повинен мати яскраво виражену нелінійну фазочастотну характеристику, причому зазвичай така нелінійність властива саме фазозсувному каналу [20].

Дослідження широкосмугових і надширокосмугових фіксованих фазообертачів на основі ліній передачі з Т- та квазі-Т-хвилями проводяться з середини ХХ століття. За цей час було запропоновано й вивчено численні варіанти отримання електричних схем фазозсувних каналів як на зв'язаних, так і на одиночних лініях передачі. Суттєвий внесок у розвиток цієї тематики зробили вітчизняні наукові школи на чолі з В. П. Мещановим та Г. М. Арістарховим, яким належить значна частина сучасних схемних рішень.

Серед різноманіття відомих конфігурацій фазозсувних каналів найбільш поширеними є схеми на основі одиночних ліній передачі зі шлейфами, а також на зв'язаних ступінчастих лініях передачі з узгодженими та неузгодженими навантаженнями. При цьому опорний канал, як правило, реалізують у вигляді однорідного відрізка лінії передачі, хоча існують і складніші варіанти, у яких структура опорного каналу оптимізується з метою покращення частотних характеристик і зменшення габаритів пристрою.

Найпростіший фазозсувний канал утворений двома зв'язаними однорідними лініями передачі, вихідні кінці яких з'єднані між собою відрізком одиночної лінії передачі. Однак робоча смуга такої структури не перевищує однієї октави. Для її розширення застосовують ступінчасті зв'язані лінії передачі, багатоланкові схеми та каскадні з'єднання відрізків зв'язаних ліній.

У конструкціях фіксованих фазообертачів на основі ступінчастих зв'язаних ліній передачі опорний канал виконується у вигляді однорідної лінії, тоді як фазозсувний канал формується зі зв'язаних ліній I або II класу. У

першому випадку вони складаються з каскаду ділянок із різними коефіцієнтами зв'язку за однакової електричної довжини, а в другому — з ділянок різної довжини з чергуванням значень коефіцієнта зв'язку. При цьому виходи останнього елемента можуть бути з'єднані або лінією нульової довжини, або відрізком лінії з фіксованими електричними параметрами.

Окремо досліджено схему фазозсувного каналу, в якій каскад зв'язаних ліній класу I навантажений короткозамкнутим шлейфом. У такій структурі шлейф виконує роль з'єднувального відрізка і вводить додаткові регулювальні параметри до математичної моделі. Натомість канал стає неузгодженим і ненапрямленим, що ускладнює задачу синтезу: окрім забезпечення необхідної фазочастотної характеристики, виникає потреба мінімізувати коефіцієнт стоячої хвилі фазозсувного каналу. Аналогічні структури можуть бути побудовані з використанням розімкнутих шлейфів або їх комбінацій, однак суттєвого покращення частотних характеристик це не забезпечує.

Відомі також фазообертачі на основі плавних зв'язаних ліній передачі, позбавлених різких геометричних неоднорідностей, притаманних ступінчастим конструкціям. Це позитивно впливає на частотні характеристики, але водночас ускладнює синтез та знижує технологічність виготовлення.

Хоча пристрої на основі зв'язаних ліній дозволяють реалізовувати надширокосмугові фазообертачі з практично ідеальним узгодженням, вони мають серйозний недолік — складність забезпечення малих зазорів між лініями при виготовленні. Натомість конструкції на одиночних лініях із шлейфами є технологічно простішими, проте не дозволяють досягти повного узгодження навіть у теоретичному випадку.

Першу структуру фазозсувного каналу на одиночній лінії зі шлейфами запропонував Роберт Вілдс у 1978 році. Конструкція складається з відрізка лінії довжиною половини прямої довжини хвилі та двох шлейфів (розімкнутого й короткозамкнутого), під'єднаних паралельно в середині лінії.

Задача аналітичного синтезу фазообертача з фазозсувним каналом у вигляді однорідної лінії довжиною $\lambda g/2$ і паралельно підключеним у центрі

чвертьхвильовим короткозамкнутим шлейфом розв'язана в роботі [21]. Там само досліджено варіанти з двома короткозамкнутими шлейфами, підключеними до кінців лінії, а також подано дуальні структури на основі розімкнутих шлейфів.

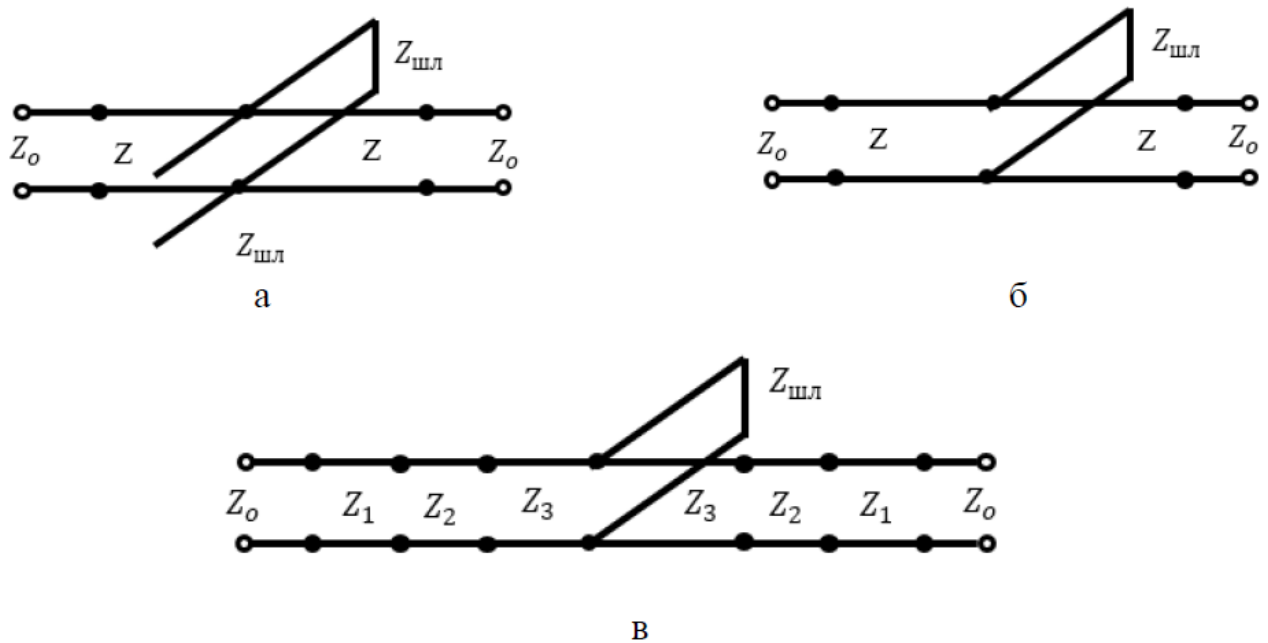


Рис. 2.2. Схематичне подання фазозсувних каналів, реалізованих на основі одиночних ліній передачі

З метою розширення робочої смуги частот і покращення частотних характеристик були виконані дослідження структур фазозсувних каналів, побудованих на одиночних ступінчастих лініях передачі класів I та II із паралельно під'єднаними короткозамкнутими шлейфами (Рис. 2.2, в). У працях також розглянуто фіксовані фазообертачі з фазозсувним каналом на основі одиночної лінії передачі з плавною зміною параметрів і шлейфом [31].

Разом з тим, у відомих на сьогодні роботах аналізувалися переважно конструкції фазообертачів на одиночних лініях передачі з однорідними короткозамкнутими шлейфами або радіальним розімкнутим шлейфом та його модифікаціями. Водночас у фільтрувальних пристроях радіосигналів доведено ефективність застосування неоднорідних короткозамкнутих шлейфів. У зв'язку з цим актуальним є вивчення можливості підвищення частотних характеристик

і зменшення масо-габаритних показників фазообертачів шляхом впровадження неоднорідних шлейфів у їх структуру.

Також відомі конструкції фазозсувних каналів, у яких застосовуються поєднання зв'язаних і одиночних ліній передачі зі шлейфами .

Останніми роками спостерігається зростання інтересу до структур фазообертачів, у яких і опорний канал має складну електричну схему. Зокрема, актуальним є зменшення електричної довжини опорного каналу, чому присвячено роботу [27]. Інша важлива задача, розглянута в [33], полягає у зменшенні коефіцієнта зв'язку між лініями передачі у фазозсувному та опорному каналах, що дозволило спростити практичну реалізацію пристроїв.

У роботі [29] розглянуто структуру фазообертача з однорідними короткозамкнутими та розімкнутими шлейфами, паралельно підключеними в крайніх точках ступінчастої лінії передачі як у фазозсувному, так і в опорному каналах. Подібна конструкція, проте з використанням однорідної лінії передачі, досліджена в [21], де для оптимізації її параметрів застосовано генетичний алгоритм.

Більш складні структури фазозсувного та опорного каналів, побудовані на основі балансних схем, описані в роботах [21–23]. Вони забезпечують узгодження фазообертачів і формування заданої фазочастотної характеристики в широкій смузі частот, проте відзначаються конструктивною складністю та значними габаритами. Так, наприклад, у фазообертачі, синтезованому авторами [24], відстань між зв'язаними лініями передачі становить менше ніж 0,2 мм, що ускладнює виготовлення пристрою. Подальшим розвитком балансних схем можна вважати конструкцію [25], реалізовану на хвилеводі, інтегрованому в діелектричну підкладку.

Підсумовуючи, можна зазначити, що найбільше досліджені фазообертачі, побудовані на основі зв'язаних ліній передачі з узгодженими навантаженнями, а також конструкції з одиночними лініями передачі та однорідними короткозамкнутими шлейфами. Водночас вплив неоднорідних (ступінчастих або плавних) шлейфів у фазозсувних каналах, реалізованих на основі

одиначних і зв'язаних ліній передачі, на параметри фазообертачів залишається недостатньо вивченим.

2.3. Фізичні процеси, що виникають у НВЧ-пристроях в умовах космічного середовища

Функціонування НВЧ-пристроїв за високого рівня потужності в умовах космічного простору спричиняє виникнення специфічних фізичних явищ, які можуть призвести до порушення роботи бортового ретрансляційного комплексу (БРК) або навіть до повної втрати його працездатності. Найбільш небезпечними серед таких процесів є газовий і мультипакторний розряди, що виникають відповідно за зниженого атмосферного тиску та у вакуумі. Найбільш вразливими до пробоїв і електричних розрядів є антенно-фідерні тракти БРК.

Різноманітність фізичних і хімічних процесів, що відбуваються під дією електромагнітних полів великої потужності, а також їх взаємний вплив істотно ускладнюють побудову єдиних теоретичних моделей електричного розряду в НВЧ-пристроях. Проте на сьогодні сформовано уявлення про основні закономірності роботи НВЧ-систем в умовах низького тиску та у відкритому космосі за рівнів потужності до 2 кВт [26].

Сучасна радіоелектронна апаратура космічних систем зв'язку функціонує в умовах негерметизованої відкритої платформи космічного апарата. Для видалення залишкових газів у НВЧ-трактах використовують спеціальні дренажні (вентиляційні) отвори, які зазвичай розміщують у фланцях у центральній частині широкої стінки хвилеводу, де щільність поверхневих струмів мінімальна (Рис. 2.3, а). Однак габарити та кількість таких отворів обмежуються вимогами електромагнітної сумісності, що призводить до значного збільшення часу дегазації системи. Крім того, забруднення внутрішніх поверхонь трактів і газовиділення з матеріалів, що використовуються, підвищують концентрацію залишкових газів. Незважаючи на застосування

ефективних методів дегазації, зокрема термічної обробки, повністю видалити адсорбовані гази неможливо. За недостатнього часу витримки внутрішній тиск у трактах може перевищувати тиск навколишнього середовища на кілька порядків, що створює сприятливі умови для розвитку газового розряду.

Газовий розряд виникає у НВЧ-трактах за великої напруженості електричного поля та пониженого тиску газового середовища. За таких умов довжина вільного пробігу електронів стає достатньою для набору енергії, необхідної для іонізації молекул газу. Залежно від складу газу, тиску, температури та напруженості електричного поля у внутрішньому об'ємі може розвинутися лавиноподібний процес іонізації, що призводить до електричного пробою. Газові розряди описуються законом Пашена, згідно з яким інтервал тисків $10 \dots 10^{-2}$ мм рт. ст. є найбільш сприятливим для їх виникнення. Саме тому дослідження й розроблення методів підвищення електричної міцності електродинамічних систем у цьому діапазоні тисків мають особливу практичну цінність.

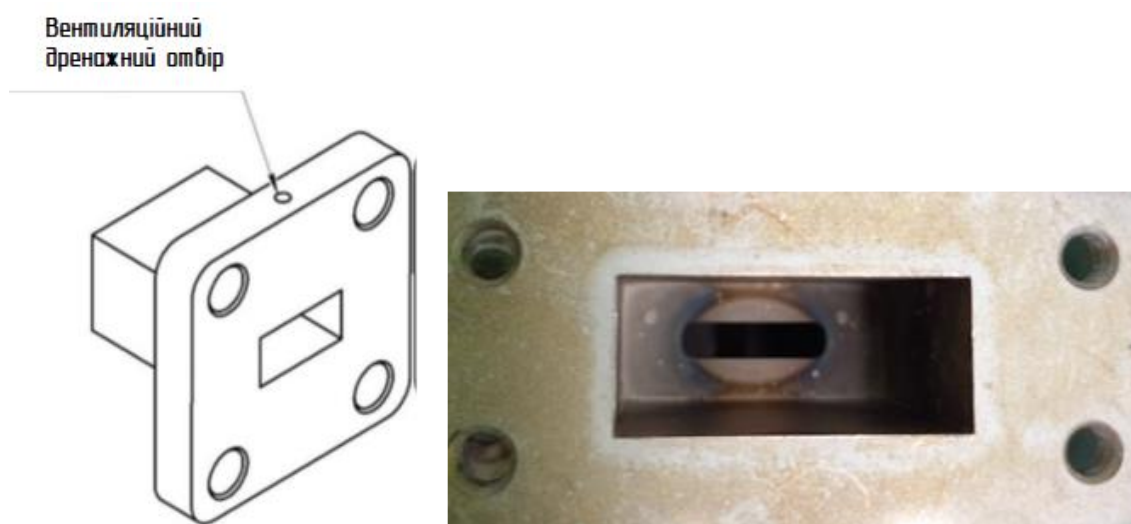


Рис. 2.3. Фланець із дегазаційним отвором хвильоводного тракту (а) та наслідки газового пробою в резонаторі смугового фільтра мультиплексора Х-діапазону (б).

За умов глибокого вакууму (порядку 10^{-5} мм рт. ст. і нижче) значно зростає ймовірність виникнення мультипакторного або вторинно-емісійного резонансного розряду. Це явище проявляється у швидкому зростанні кількості вільних електронів у внутрішньому просторі потужних НВЧ-пристроїв унаслідок вторинної електронної емісії з поверхонь елементів конструкції під дією високоенергетичних електронів. Прискорення частинок у проміжках між металевими та діелектричними елементами відбувається під впливом сильних електричних полів в умовах низького тиску. Розвиток мультипакторного розряду визначається рівнем НВЧ-потужності, формою сигналу, геометрією пристрою, розподілом електромагнітного поля, а також властивостями застосованих матеріалів і покриттів.

Мультипакторний ефект призводить до зростання рівня шуму, підвищення втрат у трактах і деградації чи руйнування покриттів (Рис. 2.3, б). Крім того, локальне газовиділення, викликане цим явищем, може індукувати розвиток газового розряду, який має значно руйнівніші наслідки. У частотних фільтрах мультипактор може викликати зміщення резонансних частот та зменшення добротності.

У зв'язку з цим у міжнародних стандартах [27], що регламентують вимоги до бортової апаратури космічних систем, передбачено обов'язкове проведення випробувань на стійкість до мультипакторного розряду. Для планарних і коаксіальних структур з урахуванням робочої частоти, геометрії зазору та матеріалів покриття можна графічно визначити гранично допустимі пікові значення напруги, перевищення яких може спричинити розвиток мультипактору [28, 29]. З огляду на складність точного математичного моделювання цього процесу європейські стандарти встановлюють необхідність закладати запас не менше 6 дБ під час чисельної оцінки порогових потужностей.

У коаксіальних з'єднувачах КВП мультипактор може виникати як між центральним і зовнішнім провідниками, так і на поверхнях діелектриків. Для

зменшення ризику його появи доцільно застосовувати з'єднувачі з перекриттям діелектричних елементів у зоні контакту (наприклад, типу TNC).

У мікросмужкових лініях передачі ймовірність розвитку мультипакторного розряду суттєво зростає в разі використання зв'язаних ліній. Зменшити цей ризик можна шляхом впровадження конструктивних рішень, які забезпечують збільшення зазору між лініями передачі до допустимого рівня, зокрема за допомогою застосування шлейфів.

2.4. Методи аналізу та синтезу електродинамічних систем

Чисельні методи й надалі залишаються основним інструментом для розв'язання різноманітних електродинамічних задач і, зокрема, застосовуються для моделювання пристроїв узгодження та фазового зсуву радіосигналів. При виборі методу електродинамічного аналізу слід враховувати складність та неоднорідність середовища, а також доступні обчислювальні ресурси. На основі досвіду розв'язання попередніх електродинамічних задач у даній роботі використано метод кінцевих елементів та метод моментів.

Оскільки пристрої узгодження та фазового зсуву сигналів є досить складними електродинамічними структурами, їх синтез лише за допомогою аналітичних методів є проблематичним. Тому параметричний синтез здійснювався із застосуванням оптимізаційного алгоритму Нелдера-Міда (симплекс-метод), який на практиці показав високу ефективність для розв'язання подібних задач.

Метод кінцевих елементів.

Одним із найефективніших засобів аналізу складних електродинамічних систем є метод кінцевих елементів (МКЕ), основи теорії якого викладені в роботах [20-23]. Його суть полягає в аппроксимації електричного та магнітного полів моделлю, побудованою на базі сукупності кусочно-неперервних функцій. Ці функції визначені на кінцевому числі підобластей, що разом утворюють досліджувану область.

У розглянутій області визначається кінцеве число точок, які називають вузлами. Значення неперервної величини, що підлягає визначенню в вузлах, розглядається як змінна. Далі область визначення $\Omega(x, y, z)$ ділиться на кінцеве число підобластей — елементів. У результаті формується дискретизаційна сітка (Рис. 2.4), що апроксимує тривимірну область.

У тривимірних задачах елементами розбиття зазвичай є тетраедри $\Omega_e(x, y, z)$. Загальна кількість таких тетраедрів формує сітку кінцевих елементів, що описує тривимірний об'єкт довільної конфігурації. Чим менший розмір елементів розбиття, тим точніше обчислення, проте збільшується витрата обчислювальних ресурсів.

У випадку поширення електромагнітної хвилі в повітряному середовищі, вільному від джерел, електричне поле всередині елемента розбиття описується рівнянням Гельмгольца:

$$\nabla^2 \bar{E}^e - k_0^2 \bar{E}^e = 0, \quad (2.1)$$

де k_0 — хвильове число вільного простору. Крім цього, задовольняються граничні умови на металевих поверхнях $n * E = 0$, а також виконується умова випромінювання Зоммерфельда.

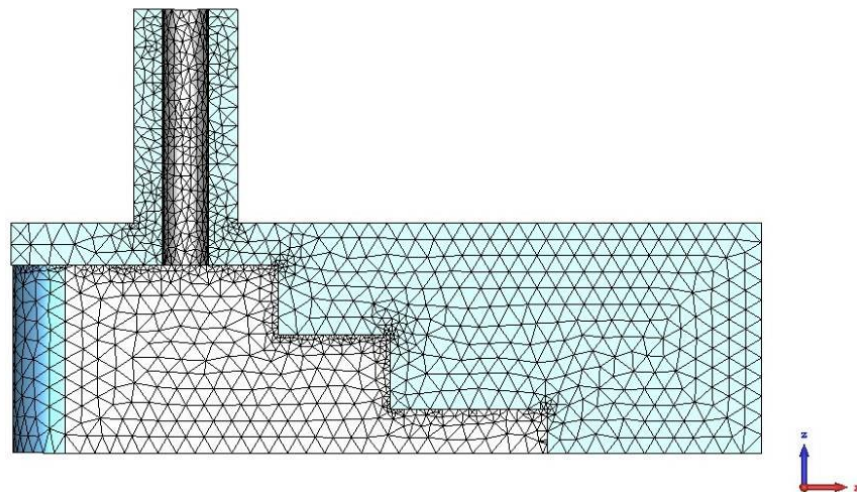


Рис. 2.4. Розрахункова кінцево-елементна сітка для моделі коаксіально-хвильоводного переходу з індуктивним зв'язком

Апроксимація електричного поля E здійснюється за допомогою реберних функцій форми W_K^E :

$$\overline{E}^e = \sum_{k=1}^6 E_k^e W_k^e, \quad (2.1)$$

де E_K^e : - Коефіцієнти розкладання, що являють собою інтеграли від касаної компоненти електричного поля E уздовж k -го ребра тетраедричного елемента між i -м та j -м вузлом. Реберні функції форми тетраедричного елемента, що мають шість невідомих (відповідно до числа ребер), мають вигляд:

$$W_k^e = l_k \left(L_i^e \nabla L_j^e - L_j^e \nabla L_i^e \right) \ddot{e}, \quad i, j = 1 \dots 4; k = 1 \dots 6, \quad (2.3)$$

де l_k - довжина k -го ребра тетраедричного елемента між i -м і j -м вузлом;

E_{ij}^e – лінійні скалярні функції форми, що зв'язують між собою координати i -го вузла (x_i, y_i, z_i) та координати будь-якої точки всередині тетраедра.

Підстановка апроксимацій із урахуванням граничних умов у рівняння Максвелла або їх еквіваленти дає систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), розв'язок якої визначає значення шуканої величини у вузлах i , відповідно, забезпечує наближене розв'язання задачі.

Для моделювання джерела збуджуючого сигналу на одному з портів розглядуваної електродинамічної системи задається джерело електромагнітного поля:

$$\overline{E}^{(1)} = M_{11} \exp(-j\beta_{11}z) + \sum_{m=1}^{\infty} S_{1m} M_{1m} \exp(-j\beta_{1m}z), \quad (2.4)$$

а для решти портів:

$$\overline{E}^{(n)} = \sum_{n,m=1}^{\infty} S_{nm} M_{nm} \exp(-j\beta_{nm}z), \quad (2.5)$$

де M_{nm} — власні функції n -ої моди nm -го порту; S_{nm} — елементи матриці розсіювання; β_{nm} — фазові сталі nm -ої моди nm -го порту.

Метод моментів.

Перевагою методу моментів є зручність моделювання розсіювання на металевих тілах, оскільки аналіз зводиться до розв'язання поверхневих інтегральних рівнянь і не потребує дискретизації області поза тілами.

У методі моментів задача розв'язується відносно струмів, а кінцеві елементи задаються лише для областей неоднорідностей, які можуть бути замінені еквівалентним розподілом об'ємних або поверхневих струмів. Існує кілька варіантів методу моментів, суть яких полягає у заміні інтегрального рівняння системою алгебраїчних рівнянь.

У загальному випадку метод моментів виглядає так: інтегральне рівняння, розв'язок якого потрібно отримати, можна записати у вигляді

$$Lf = g, \quad (2.6)$$

де L - інтегральний оператор, g і f - відома і невідома функції відповідно. Отримане співвідношення зводиться до матричного рівняння шляхом розположення невідомої функції f в ряд за базовими функціями ϕ_n :

$$f = \sum_{n=1}^N C_n \phi_n, \quad (2.7)$$

де C_n - невідомі коефіцієнти розкладання. Тоді матричне рівняння можна записати в наступному вигляді:

$$\sum_{m=1}^N C_m \langle \chi_m, L\phi_n \rangle = \langle g, \chi_m \rangle, \quad (2.8)$$

де трикутні дужки відповідно позначають певний скалярний добуток, а χ_m — функції, що називаються пробними або ваговими.

Отриману систему алгебраїчних рівнянь можна розв'язувати або шляхом обертання матриці, або за допомогою ітераційних методів. Іноді застосовується також метод виключення головного елемента.

При моделюванні мікрополосових структур, що розглядаються в цій дисертаційній роботі, ключову роль відіграє функція Гріна (ФГ), яка є розв'язком рівняння Гельмгольца та використовується для формування інтегральних рівнянь (ІР). Скалярна ФГ має вигляд:

$$G(r, r') = \frac{e^{-ikR}}{4\pi R}, \quad (2.9)$$

де $R=|r-r'|$ — радіус-вектор між точкою спостереження та джерелом. Розв'язок зазвичай будується аналітично і може бути отриманий для обмеженого числа простих геометричних форм, таких як циліндр, сфера, паралелепіпед або шаруваті структури.

При побудові ФГ для замкнених областей простих форм зазвичай застосовується метод власних функцій. Маючи ФГ середовища, можна визначити поле від довільного розподілу джерел і скласти інтегральні рівняння на основі залишкових граничних умов, які не враховувалися при побудові ФГ.

Методи параметричної оптимізації.

Одним із ключових етапів синтезу електродинамічних структур (електричних кіл) НВЧ-пристроїв є параметрична оптимізація. Вона являє собою процес пошуку значень вектора змінних параметрів математичної моделі, за яких забезпечується оптимальне функціонування пристрою відповідно до заданих критеріїв. На практиці задачі оптимізації здебільшого

мають багатопараметричний характер. Окремим випадком параметричної оптимізації можна вважати апроксимацію, тобто визначення таких параметрів пристрою, за яких його характеристики найменше відхиляються від заданих.

Для виконання задачі синтезу НВЧ-пристрою спершу необхідно визначити його електродинамічну структуру (або схему кола), побудувати математичну модель, а далі розв'язати задачі апроксимації характеристик структури (кола) та значень її електродинамічних параметрів. Цей етап синтезу отримав назву повного синтезу НВЧ-пристрою.

Апроксимація формулюється як задача мінімізації певної функції $G(V)$ вектора змінних параметрів V , що характеризує наближеність характеристик пристрою $F(V, \theta)$ до заданих $F_0(\theta)$.

$$G(V) = \|F_0(\theta) - F(V, \theta)\|_E \rightarrow \min_{V \in D} G(V) \text{ или } \max_{V \in D} G(V), \quad (2.10)$$

Де $F_0(\theta)$ — задана характеристика пристрою, E — множина значень змінної θ , D — множина точок n -вимірного простору параметрів E_n , $\|\cdot\|$ — критерій близькості функцій $F_0(\theta)$ та $F(V, \theta)$.

У ролі апроксимуючої функції $F(V, \theta)$ виступає певна характеристика електродинамічної структури (електричного кола), наприклад: амплітудно-частотна характеристика (АЧХ), фазо-частотна характеристика (ФЧХ) тощо.

$$G(V) = \left(\int_E \rho(\theta) |F_0(\theta) - F(V, \theta)|^p d\rho \right)^{1/p}, \quad (2.11)$$

Де $\rho(\theta) > 0$, p — ціле число. Розв'язок, отриманий із застосуванням середньостепеневого критерію, може ефективно використовуватися як початкове наближення при пошуку більш оптимальних рішень.

Найбільш поширеним і водночас найбільш досконалим вважається чебишевський критерій, який також має назву мінімаксного.

$$G(V) = \max_{\theta \in E} \rho(\theta) |F_0(\theta) - F(V, \theta)|. \quad (2.12)$$

На практиці під час застосування критерію (2.12) часто переходять до дискретної множини точок $\{\theta_i\}$. У такому випадку вираз (2.10) набуває вигляду:

$$G(V) = \min_{V \in D} \max_{i \in I} \rho(\theta_i) |F_0(\theta_i) - F(V, \theta_i)| = \min_{V \in D} \max_{i \in I} R_i(V), \quad (2.13)$$

є I — кінцева множина індексів, що відповідає числу дискретної сукупності точок.

З точки зору витрат обчислювального часу, критерій Чебишева має перевагу над середньоквадратичним критерієм.

Для мінімізації функції $G(V)$ існує велика кількість різноманітних алгоритмів оптимізації. Найбільш поширеними є:

- методи Розенброка та Пауелла,
- метод покрокового спуску по координатах,
- градієнтний метод (метод найшвидшого спуску),
- генетичні алгоритми,
- симплексний метод.

З них найефективнішим та універсальним для вирішення задач оптимізації структур НВЧ-пристроїв є симплексний метод. Саме тому більша частина пристроїв, розглянутих у цій роботі, синтезована з його використанням.

Симплексний метод широко застосовується при розв'язанні багатопараметричних задач оптимізації і належить до прямих методів мінімізації. Він дозволяє знайти крайню точку опуклого багатогранника (симплекса) та визначити, чи є вона точкою екстремуму цільової функції. Якщо

ні, відбувається перехід до сусідньої крайньої точки, де значення цільової функції менше або більше попереднього. Ця операція повторюється до тих пір, поки точка екстремуму не буде знайдена або не буде визнана такою, що не існує.

Симплекс має чотири вершини у тривимірному просторі та три вершини у двовимірному. Для побудови симплекса задається базова точка $x^{1,1}$, а координати інших n вершин симплекса з довжиною ребра 1 визначаються за співвідношеннями:

$$x_j^{(1,i)} = \begin{cases} x_j^{(1,1)} + l \frac{\sqrt{n+1}-1}{n\sqrt{2}}, i = j+1; \\ x_j^{(1,1)} + l \frac{\sqrt{n+1}+n-1}{n\sqrt{2}}, i \neq j+1, \end{cases} \quad (2.14)$$

Далі обчислюється значення розглядуваної функції у вершинах симплекса. Вибирається вершина, у якій це значення є максимальним, і будується її дзеркальне відображення відносно площини, в якій розташовані інші вершини симплекса. Внаслідок цього формується новий симплекс, утворений новою вершиною та вершинами першого симплекса. Ця операція називається відображенням. Точка, яка знаходиться на однаковій відстані від усіх вершин, називається центром тяжіння симплекса.

На наступному етапі обчислюють значення шуканої функції у новій вершині. Якщо воно менше, ніж у попередній вершині, операції відображення вершин нових симплексів продовжуються до тих пір, поки значення функції в новій вершині не стане менше, ніж у попередній. Умовою зупинки пошуку може бути виконання певних заданих умов, наприклад:

$$\sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} [f(x_i) - f(c)]^2} \leq \varepsilon, \quad (2.15)$$

де ε — задане число.

Описаний алгоритм використовує регулярні симплекси, тому його можна застосовувати лише для цільових функцій з досить простою топологією поверхні.

У більш складних випадках доцільно використовувати алгоритм із деформованим симплексом, відомий як метод Нелдера-Міда. Крім процедури відображення, у ньому передбачені також операції стискання та розтягування.

2.5. Висновки до розділу 2

Розглянуто основні різновиди коаксіально-хвильоводних переходів та проведено їх класифікацію за типом електромагнітного зв'язку, способом введення лінії передачі у хвильвід та конструктивними особливостями. Показано, що вибір конкретної конструктивної схеми істотно впливає на електричну міцність, коефіцієнт стоячої хвилі, втрати потужності та стабільність параметрів пристроїв у широкому частотному діапазоні. Встановлено, що традиційні конструкції не повною мірою відповідають вимогам сучасних космічних систем, особливо в умовах вакууму та підвищених теплових навантажень.

Проаналізовано відомі структури фіксованих фазообертачів та визначено їх переваги й обмеження з точки зору технологічності виготовлення, габаритів, робочої смуги частот та електричної міцності. Показано, що наявні технічні рішення не завжди забезпечують необхідну стабільність фазових характеристик при впливі зовнішніх факторів космічного середовища, що обумовлює доцільність пошуку нових електродинамічних структур фазообертачів із покращеними експлуатаційними показниками.

Розглянуто особливості фізичних процесів, що виникають у НВЧ-пристроях в умовах космічного середовища, зокрема явища вторинної електронної емісії, накопичення електричних зарядів, теплові навантаження та деградацію матеріалів під дією іонізуючого випромінювання.

Показано, що ці фактори можуть призводити до зниження електричної міцності, зміни електричних параметрів та виникнення пробою, що необхідно враховувати на етапі проєктування та моделювання пристроїв.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1. Призначення, класифікація фазуючих пристроїв

Фазуючі пристрої використовуються для реалізації таких функцій:

1. Забезпечення плавної або ступінчастої зміни фази електромагнітної хвилі (ЕМХ) в одному каналі чи перетині фідерної системи відносно фази ЕМХ в іншому каналі або перетині [32].
2. Формування постійного або змінного різницевого фазового зсуву між ЕМХ, що поширюються по лінії передачі у протилежних напрямках, або між хвилями з взаємно ортогональною поляризацією.

Класифікація фазуючих пристроїв:

- За типом лінії передачі: коаксіальні, полоскові, хвильові.
- За способом зміни фази: механічні, електрично керовані.
- За видом фазового зсуву: плавні, дискретні.
- За методом створення фазового зсуву: прохідні, відбивні.
- За наявністю фазового зсуву для зустрічних хвиль: взаємні, невзаємні.

Принцип роботи: Дія фазуючих пристроїв ґрунтується на властивості електромагнітної хвилі набувати фазового зсуву під час проходження певної відстані в середовищі з визначеними електричними та геометричними характеристиками. Фазовий набіг $\Delta\varphi$, який отримує хвиля при поширенні по лінії передачі довжиною l , визначається за таким виразом:

$$\Delta\varphi = k'l = \frac{2\pi}{\Lambda} l, \quad (3.1)$$

де $k' = 2\pi/\Lambda$ - коефіцієнт поширення ЕМВ в лінії передачі;
 k' - коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі (ЕМХ) у лінії передачі;
 Λ — довжина хвилі в лінії передачі.

Відомо, що довжина хвилі в лінії передачі визначається довжиною хвилі генератора та конструктивними особливостями лінії — її типом, геометричними параметрами, а також електричними характеристиками діелектричного середовища, яке її заповнює.

Таким чином, фазовий зсув ЕМХ під час поширення в лінії передачі можна змінювати наступними способами [27]:

1. варіювати геометричну довжину ділянки лінії передачі l ;
2. вмикати в лінію зосереджені реактивні елементи, які, створюючи неоднорідність, змінюють розподіл електромагнітного поля уздовж лінії, що еквівалентно зміні її ефективної довжини;
3. модифікувати поперечні розміри лінії передачі, наприклад, ширину стінки прямокутного хвилеводу, що призводить до зміни критичної довжини хвилі $\lambda_{кр}$ і, відповідно, довжини хвилі Λ у хвилеводі;
4. коригувати електричні властивості заповнювального діелектрика — відносну діелектричну та магнітну проникність, що також впливає на довжину хвилі в лінії передачі.

На базі перелічених принципів реалізовано різні типи фазуючих пристроїв.

3.2. Хвилеводні фазообертачі, що використовують діелектричні пластини й металеві вставки

Механічний хвилеводний фазообертач з діелектричною пластиною являє собою відрізок прямокутного хвилеводу, в якому поширюється хвиля типу H_{10} , або круглого хвилеводу з хвилею H_{11} . Усередині хвилеводу розміщується пластина з діелектрика з малими втратами та відносною діелектричною проникністю $\epsilon > 1$.

Розрізняють такі конструктивні варіанти фазообертачів із діелектричними пластинами:

1. Діелектричну пластину встановлюють всередині прямокутного хвилеводу паралельно силовим лініям електричного поля (рис. 3.1). За умови

розміщення пластини поблизу вузької стінки хвилеводу її вплив на поширення ЕМХ незначний, оскільки в цій зоні напруженість електричного поля є малою. Під час зміщення пластини до центральної області, де спостерігається максимум поля, відбувається зменшення напруженості поля.

Це еквівалентно тому, що в ділянці з пластиною внутрішній простір хвилеводу заповнюється однорідним діелектриком з ефективною проникністю $\epsilon_{\text{еф}}$, яка змінюється в межах:

$$1 < \epsilon_{\text{еф}} < \epsilon \quad (3.2)$$

Внаслідок переміщення пластини від стінки до середини хвилеводу значення $\epsilon_{\text{еф}}$ зростає, що спричиняє зменшення довжини хвилі Λ у хвилеводі та збільшення фазового зсуву електромагнітної хвилі.

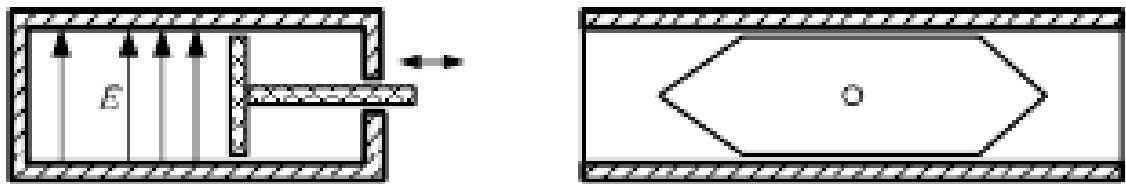


Рис. 3.1. Хвилеводний фазообертач з діелектричної пластиною 1

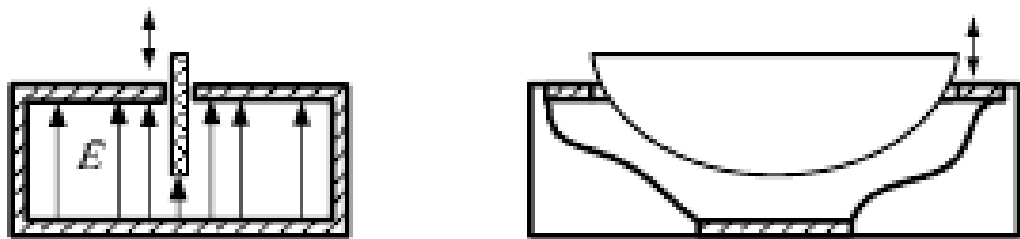


Рис. 3.2. Хвилеводний фазообертач з діелектричної пластиною 2

Для зменшення відбиттів від торців діелектричної пластини її краї виконують скошеними у вигляді клину, а довжину вибирають кратною половині довжини хвилі:

$$l_{\text{пл}} = n\Lambda, n=1,2,3 \quad (3.3)$$

Це забезпечує компенсацію відбитих хвиль за рахунок їх протифазного додавання з входу та виходу пластини. Завдяки цьому покращується узгодження фазообертача з хвилеводною системою.

2. У другому варіанті конструкції діелектричну пластину вводять у прямокутний хвилевід через подовжній проріз, розташований уздовж центра широкої стінки, при цьому вона постійно перебуває в області максимальної напруженості електричного поля (рис. 3.2).

Під час зміни глибини введення пластини змінюється ефективна діелектрична проникність ϵ_{ef} , а отже — і фазовий зсув електромагнітної хвилі. Зі збільшенням глибини занурення пластини зростає ϵ_{ef} , що призводить до збільшення фазового набігу хвилі у хвилеводі. Щоб зменшити відбиття, пластині надають форму частини кола.

3. У третьому типі конструкції діелектричну пластину розміщують у круглому хвилеводі з хвилею типу H_{11} і забезпечують можливість її обертання навколо поздовжньої осі хвилеводу (рис. 3.3).

Якщо пластина орієнтована перпендикулярно до силових ліній електричного поля хвилі H_{11} , то її вплив на поширення ЕМХ є мінімальним. У разі ж розташування пластини паралельно вектору напруженості поля ефективна проникність середовища збільшується, що спричиняє зростання фазового зсуву.

Аналогічно до конструкції в прямокутному хвилеводі, для покращення узгодження довжину пластини вибирають кратною половині довжини хвилі, а її краї виконують клиноподібними.

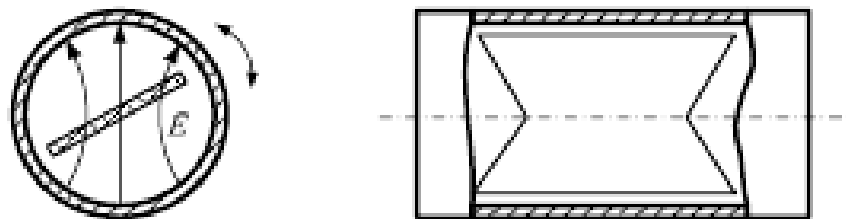


Рис. 3.3. Хвилеводний фазообертач з діелектричної пластиною 3

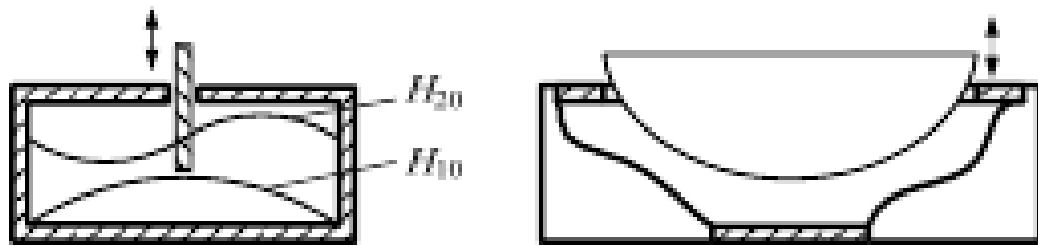


Рис. 3.4. Механічний хвиеводний фазообертач з металевою вставкою

Механічний хвиеводний фазообертач із металевою вставкою являє собою ділянку прямокутного хвиеводу, в яку через подовжній проріз у центрі широкої стінки вводиться металева пластина (рис. 3.4).

Фазове зміщення електромагнітної хвилі в такій конструкції пояснюється тим, що в області хвиеводу, де розташована металева вставка, збуджується хвиля типу H_{20} , для якої критична довжина хвилі дорівнює $\lambda_{кр}=a$, на відміну від хвилі H_{10} з критичною довжиною $\lambda_{кр}=2a$. У результаті взаємодії цих двох хвиль з різними критичними довжинами на виході фазообертача формується сумарний фазовий зсув.

Очевидно, що зі збільшенням глибини введення металевієї пластини у хвиевід зростає і величина результуючого фазового зсуву електромагнітної хвилі на виході пристрою.

3.3. Електронно-регульовані діодні фазообертачі у двох виконаннях — аналогові та дискретні

У випадках, коли потрібна висока швидкість зміни фази електромагнітної хвилі, застосовують фазообертачі з електронним керуванням, виконані на напівпровідникових високочастотних діодах [26].

За характером формування фазового зсуву такі пристрої можуть бути безперервної (аналогової) або ступінчастої (дискретної) дії. Реалізація електронно-керованих фазообертачів зазвичай базується на схемах із варикапами або р-і-п діодами.

Одна з типових схем фазообертача на варикапах показана на рис. 3.7. Варикап — це напівпровідниковий діод, електрична ємність якого змінюється залежно від прикладеної напруги. У хвилевід він, як правило, вмикається паралельно, як продемонстровано на схемі.

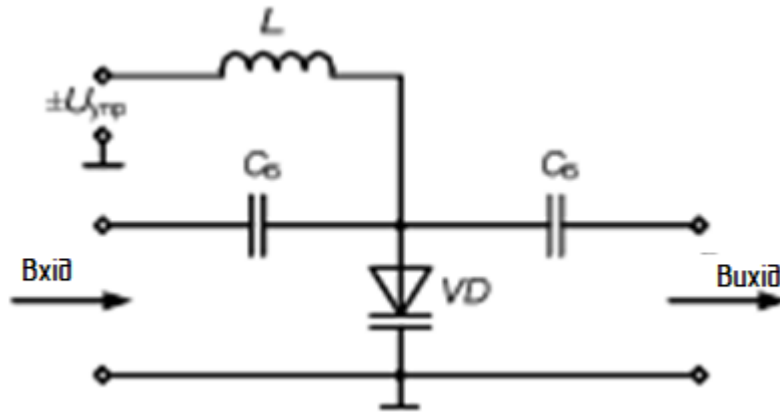


Рис. 3.5. Фазообертач на варикапах

Залежно від величини та знака керуючої напруги $U_{упр}$ у такому фазообертачі можуть реалізовуватися різні режими функціонування.

1. Режим замикання хвилеводу.

Цей режим забезпечується подачею на варикап додатної керуючої напруги. У такому випадку варикап в еквівалентній схемі поводить себе як короткозамкнена ділянка в точці підключення.

Даний режим застосовується в дискретних фазообертачах відбивного типу, де використовується декілька варикапів. Дискретна зміна фази досягається за рахунок варіювання довжини шляху, який проходить електромагнітна хвиля від входу до точки відбиття та у зворотному напрямку.

2. Режим безперервного регулювання фази.

Він реалізується шляхом подачі на варикап від'ємної керуючої напруги. У цьому режимі варикап на еквівалентній схемі є зосередженим ємнісним елементом, дія якого еквівалентна зміні ефективної довжини лінії передачі.

Такий принцип використовується у прохідних аналогових фазообертачах. Один варикап дозволяє змінювати фазу приблизно до 45° , а для отримання більшого фазового зсуву в хвилевід вмикають кілька варикапів (6–8 штук).

Переваги та недоліки фазообертачів на варикапах

До переваг належить незначна потужність керуючих кіл, яка складає лише кілька міліват при керуючій напрузі порядку одиниць вольт.

Недоліками є відносно невисока точність регулювання фази та обмеження на рівень потужності електромагнітної хвилі, що передається хвилеводом. Через це фазообертачі з варикапами переважно застосовуються в приймальних пристроях.

3.4. Фазообертачі відбивного типу з дискретним керуванням

Фазообертачі відбивного типу з дискретною зміною фази реалізуються на основі р-і-п діодів. Вони позбавлені основних недоліків варикапних схем і забезпечують роботу з великими потужностями високочастотного сигналу — від одиниць ват до кіловат.

В основу роботи таких пристроїв покладено специфічні властивості р-і-п діодів.

Р-і-п діод складається з р- та п-областей, між якими розміщений слаболегований або практично чистий напівпровідниковий шар — так звана і-область (рис. 3.6, а).

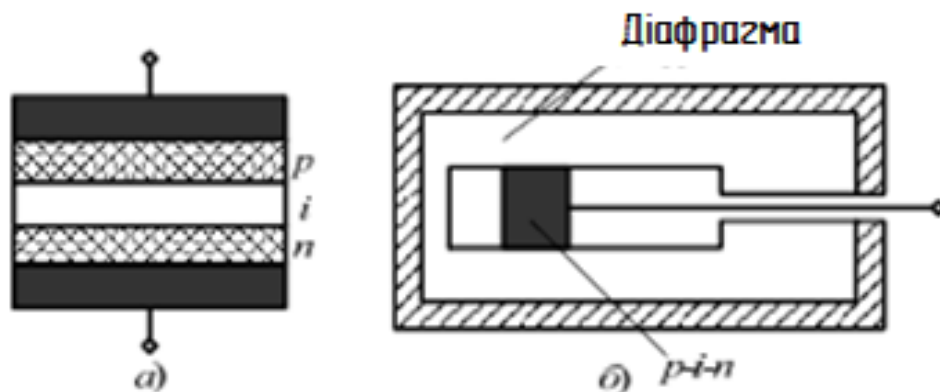


Рис. 3.6. Дискретний фазообертач відбивної типу

За наявності від'ємного зміщення р-і-п діод працює як елемент з малою ємністю та майже не впливає на поширення електромагнітної хвилі. У разі подачі додатної напруги відбувається активне впорскування електронів і дірок з р- та n-областей в і-область, унаслідок чого її опір суттєво зменшується, і діод фактично переходить у режим короткого замикання.

Такі діоди встановлюють у резонансну діафрагму, розміщену всередині хвилеводу (рис. 3.6, б). Залежно від величини та полярності прикладеної напруги електромагнітна хвиля або проходить через діафрагму, або відбивається від неї, що дає змогу реалізувати дискретний фазообертач відбивного типу (рис. 3.7).

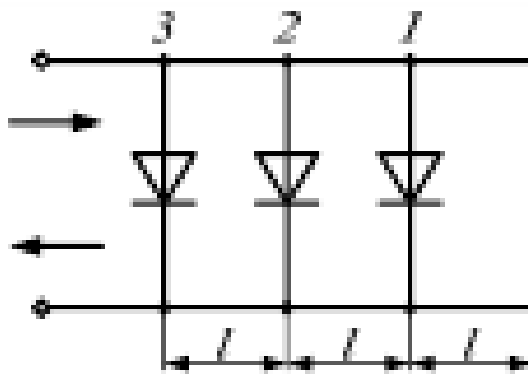


Рис. 3.7. Дискретний відбивний фазообертач

За від'ємного зміщення на всіх діодах електромагнітна хвиля відбивається від кінцевої стінки хвилеводу, яка працює як коротке замикання. Якщо ж на перший діод подати додатну напругу, то відбиття хвилі відбувається вже від відповідної діафрагми, і фаза хвилі на виході, порівняно з попереднім режимом, змінюється на значення $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi l}{\lambda}, \quad (3.4)$$

Очевидно, що при позитивному включенні будь-якого діода зміна фази буде визначатися виразом

$$\Delta\varphi_n = \frac{4\pi l n}{\lambda}, \quad (3.5)$$

де n — порядковий номер діода, на який подано додатну напругу.

Якщо встановити відстань між діафрагмами рівною $l = \lambda/16$, то використовуючи три діоди разом із торцевою стінкою хвилеводу, можна реалізувати дискретну зміну фази з кроком 45° .

3.5. НВЧ фазообертачі, реалізовані на феритових елементах

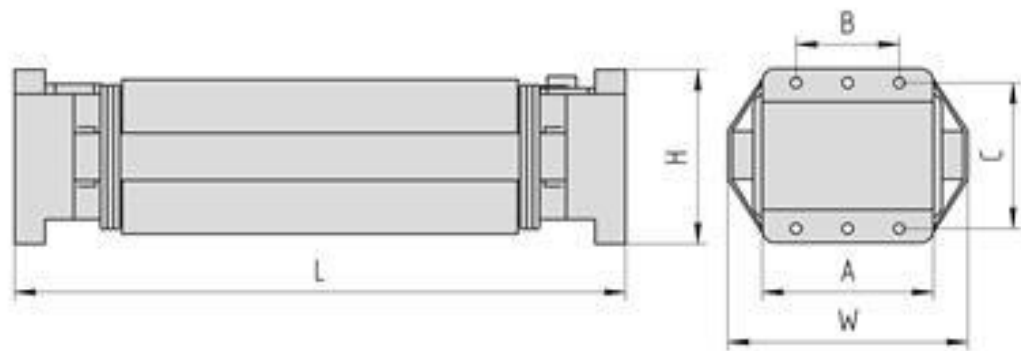


Рис. 3.8. Феритовий фазообертач у хвилеводі взаємного типу для см-діапазону

Таблиця 3.1

Експлуатаційні параметри при звичайних кліматичних умовах

Назва типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °, не менше	Час необхідний для перемикання	Робоча температура, °С	L*W*H, мм			Отвори для підключення, мм		
						L	W	H	A	B	C
ФВФН2-27	6.5 - 7.0	0.9	360	≥ 105 мкс	- 50 ÷ +60	71	27.5	20.1	19.9	12	16.8

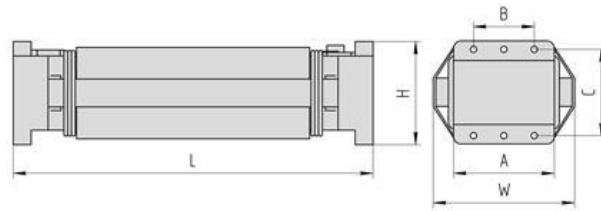


Рис. 3.9. Феритовий фазообертач у хвилеводі взаємного типу для см-діапазону

Таблиця 3.2

Експлуатаційні параметри при звичайних кліматичних умовах

Назва типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °, не менше	Час необхідний для перемикавання	Робоча температура, °С	L*W*H, мм			Отвори для підключення, мм		
						L	W	H	A	B	C
Фазоповертач ФТСК.467711.001	8.8-9.6	1.0	360	≥ 90 мкс	- 60 ÷ +70	55.25	20	15.2	16.3	8	12.2

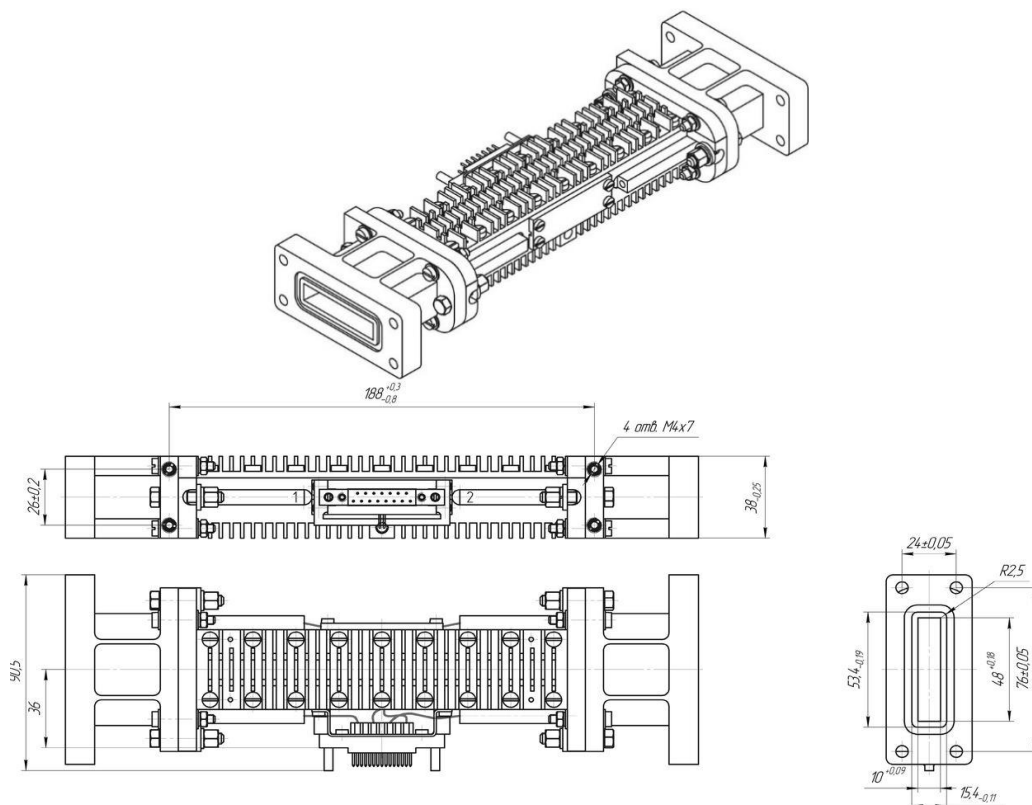


Рис. 3.10. Прилад ФВФВ2-18 — хвилеводний феритовий тороїдальний фазообертач високої потужності

Таблиця 3.3

Експлуатаційні параметри при звичайних кліматичних умовах

Назва типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °, не менше	Час необхідний для перемикавання	Робоча температура, °С
ФВФВ2-17	3.9 -4.2	0.9	360	≥ 30 мкс	-50 ÷ +50
ФВФВ2-18	2.69 -3.17	0.9	360	≥ 30 мкс	-50 ÷ +60

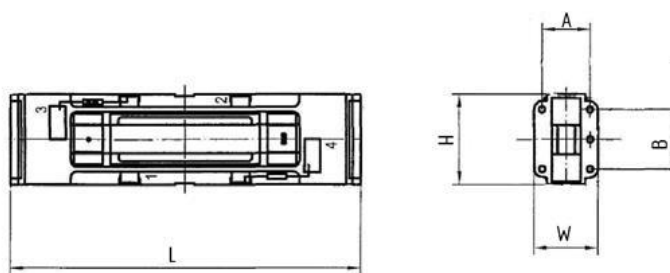


Рис. 3.11. Фазообертач на фериті взаємного принципу роботи для см-діапазону

Таблиця 3.4

Експлуатаційні параметри при звичайних кліматичних умовах

Назва типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Втрати, дБ, не більше	Регульований фазовий зсув, °, не менше	Час необхідний для перемикавання	Робоча температура, °С	L*W*H, мм			Отвори для підключення, мм	
						L	W	H	A	B
ФВФН2-25	6.5-7.0	1.1	360	≥ 520 мкс	- 50 ÷ +65	110	20	28	15	18

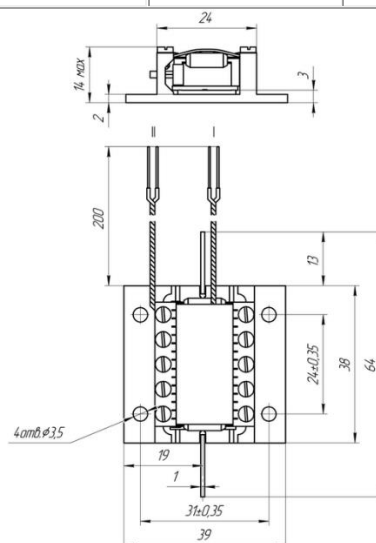


Рис. 3.12. Фазообертач мікрополоскового типу з феритовими елементами

Таблиця 3.5

Експлуатаційні параметри при звичайних кліматичних умовах

Назва типу приладу	Робочий діапазон частот, ГГц	Втрати, дБ, не більше	Максимальні втрати, дБ, не більше	Максимальний керований фазовий зсув, °, не менше	Робоча температура, °С	Вхідна імпульсна потужність НВЧ, кВт, $\geq$	Вхідна середня потужність НВЧ, Вт, $\geq$
ФПФН2-4	3,9-4,2	2,2	2,6	440	-50 ÷ +50	0,3	50
ФПФН2-4-01	3,9-4,2	2,2	2,6	420	-50 ÷ +50	0,3	50

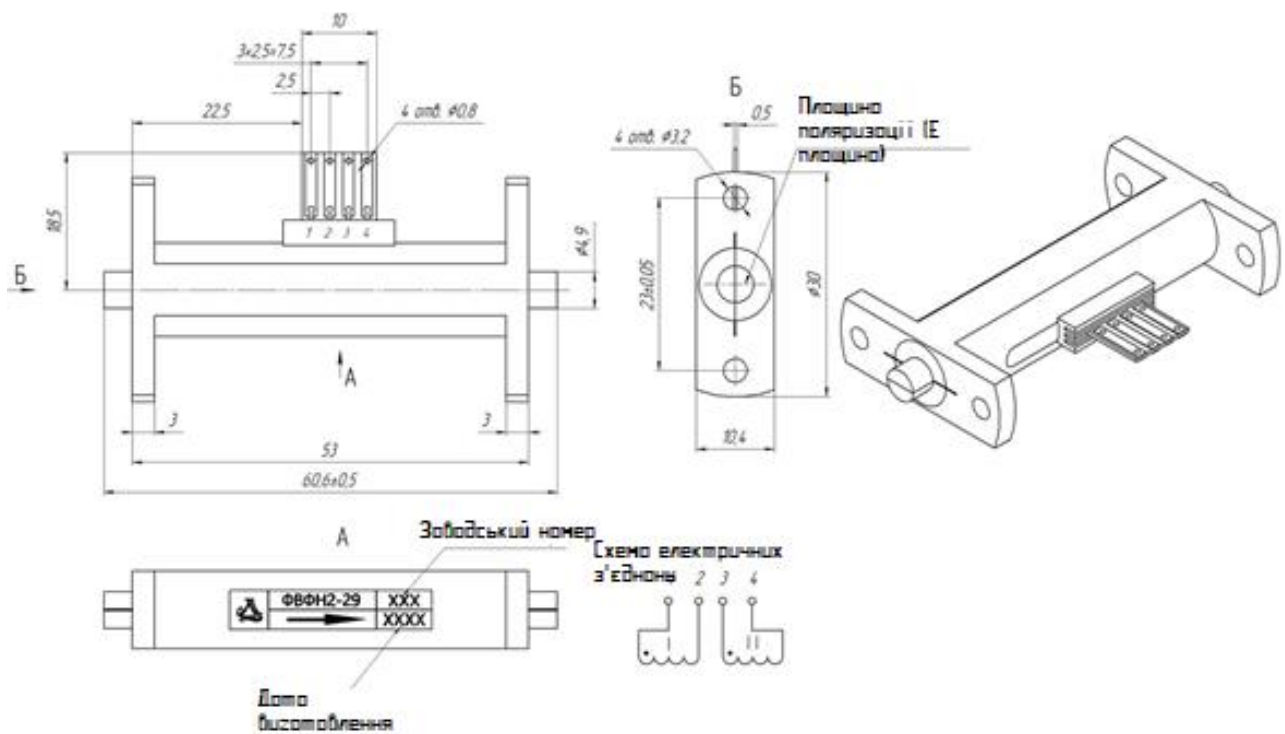


Рис. 3.13. Феритові пристрої фазового зсуву хвильові: ФВФН2-29 і ФВФН2-29М

ФВФН2-29-01 низького рівня потужності см діапазону довжин хвиль (Вхід і вихід фазообертачів узгоджені на стандартний хвилевід перетином 16x8 мм).

Таблиця 3.6

Експлуатаційні параметри при звичайних кліматичних умовах

Позначення приладу	Діапазон робочих частот, ГГц	Прямі втрати пор. / Макс, дБ, $\geq$	Максимальний керований фазовий зсув, ... °, $\leq$	Час перемикання фазового зсуву, мкс, $\geq$	Діапазон робочих температур, °C	КС ХН, $\leq$	Потужність, Вт		Енергія перемикання, мкДж, $\leq$	Управління, В / А, $\leq$	Маса, кг,
							середня	імпульсна			
ФВФН2-29, ФВФН2-29М, ФВФН2-29-01	15,9 8-16,3 2	1/1,5	400	100	від 80 до мінус 50	1,5	1,8	80	800	30/2	0,02

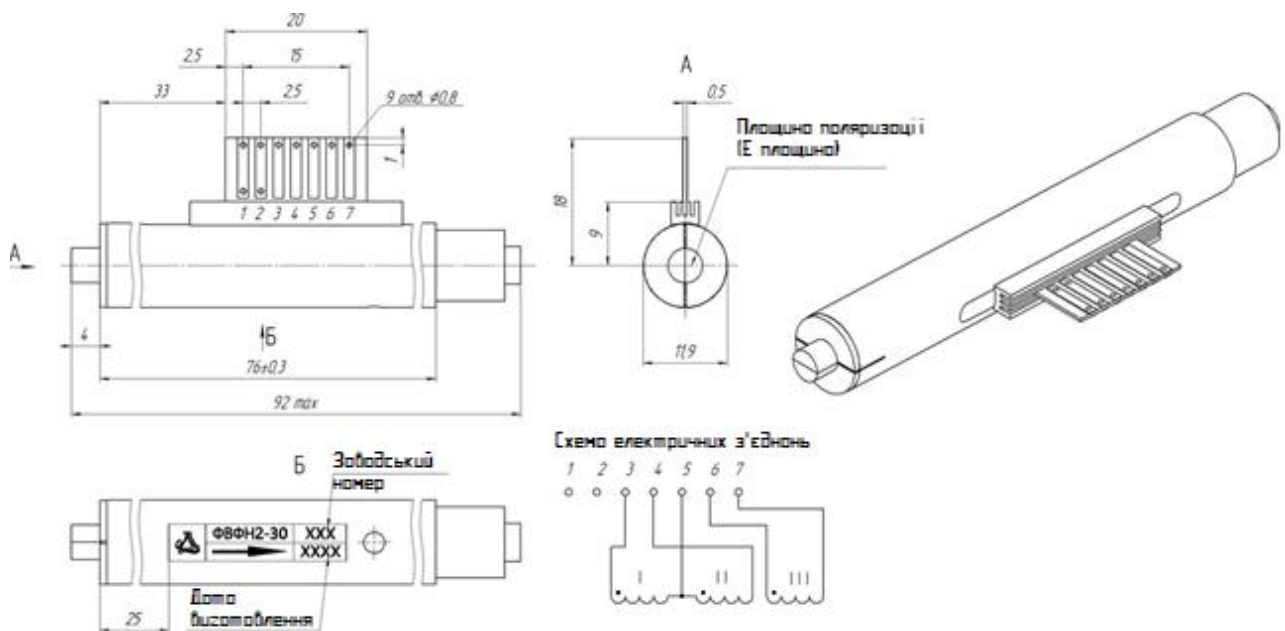


Рис. 3.14. Пристрій фазового зсуву ФВФН2-30 — хвильовий феритовий фазообертач низької потужності сантиметрового діапазону (вхід узгоджений на хвилевід 16×8, вихід — у відкритий простір)

Таблиця 3.7

Експлуатаційні параметри при звичайних кліматичних умовах

Позначення приладу	Діапазон робочих частот, ГГц	Прямі втрати макс, дБ, не більше	Максимальний керований фазовий зсув, ... °; не менше	Час перемикування фазового зсуву, мкс, не більше	Час перемикування поляризації, мс, не більше (при струмі мА не більше)	Ослаблення ортогональних лінійно поляризованих сигналів, дБ, не менше	Діапазон робочих температур, °С	КС ХН, не більше	Потужність, Вт		Енергія перемикування, мкДж, не більше	Управління фазовим зрушенням, В / А, не більше	Маса, кг, не більше
									середня	імпульсна			
ФВФ Н2-30	16,0 - 16,3	1,7	420	100	3 (100)	20	від 80 до мінус 50	1,6	1,8	80	800	30/2	0,03

Оцінка КСХн хвилеводу 61×10 мм, що містить діелектричну пластину.

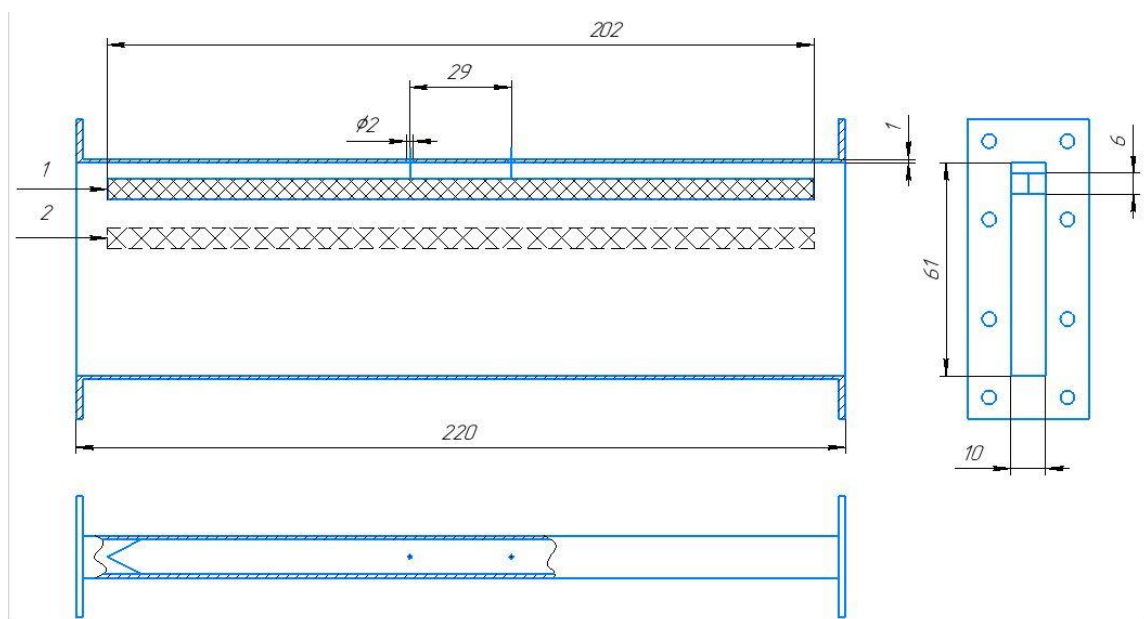


Рис. 3.15. Один із варіантів конструкції фазоповертача хвилеводного типу

1- діелектрична пластина знаходиться в положенні 1;

2- діелектрична пластина знаходиться в положенні 2;

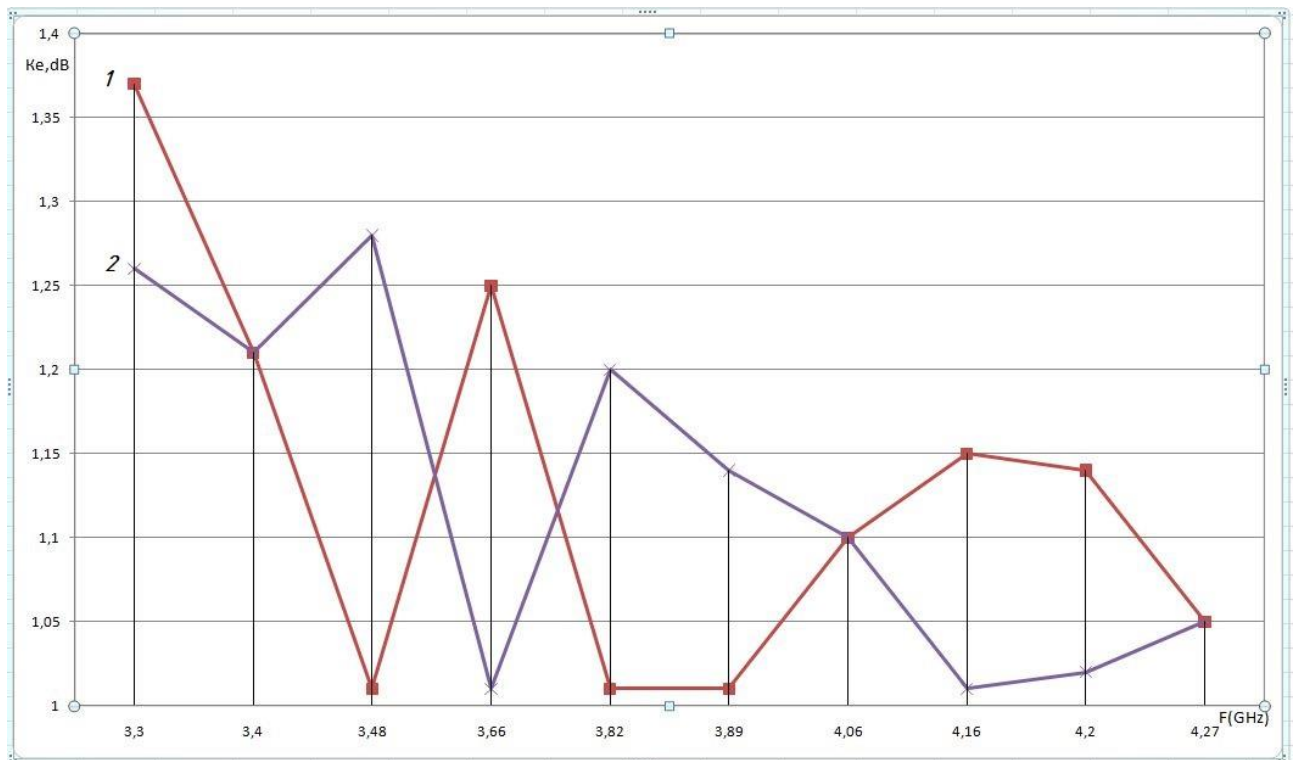


Рис. 3.16. Вимірювальні діаграми КСХн у робочому діапазоні частот за умов двох фіксованих положень діелектричних пластин

3.6. Фазовий зміщувач на 90 градусів а основі квадратного хвильоводу з діафрагмами

Сучасні антенні системи з обробкою поляризаційних сигналів використовуються для покращення інформаційних параметрів оброблюваних у них сигналів [1, 2]. Основними елементами таких систем є хвильоводні фільтри [3], фазообертачі [4] та поляризатори [5, 6]. Фазообертачі забезпечують необхідні значення фази на виході. Поляризатори забезпечують диференціальний фазовий зсув на виході на 90° [7]. Найпоширенішими структурами хвильоводних поляризаторів є структури з діафрагмами [8, 9], штифтами [10, 11], комбіновані зі штифтами та діафрагмами [12, 13], а також коаксіальні структури [14, 15] та ребристі структури [16, 17]. Диференціальний

фазообертач використовується при розробці фазованих антенних решіток, при формуванні променя в сучасних антенних системах та для систем живлення сучасних антен [18]. Сучасні 90° фазообертачі [19, 20] мають розширений функціонал, просту компактну геометричну форму, стійкість до амплітудного дисбалансу, здатність підтримувати стабільну фазу при багатопроменевому поширенні. Крім того, такі пристрої іноді використовуються в системах 5G [21].

Метою роботи є дослідження основних характеристик фазообертача на основі квадратного хвилеводу з діафрагмами в робочому діапазоні частот 7-10 ГГц.

Конструкція фазообертача на основі квадратного хвилеводу з трьома діафрагмами, розташованими симетрично відносно центральної діафрагми, показана на рис. 1. Висота двох крайніх діафрагм дорівнює h_1 , а висота середньої більша за крайні h_2 , товщина всіх діафрагм дорівнює w , а відстань між діафрагмами однакова і становить l . Створена конструкція фазообертача забезпечує основні фазові та узгоджувальні характеристики. Оптимізація конструкції здійснюється у відповідному комерційному програмному середовищі шляхом зміни геометричних розмірів конструкції пристрою.

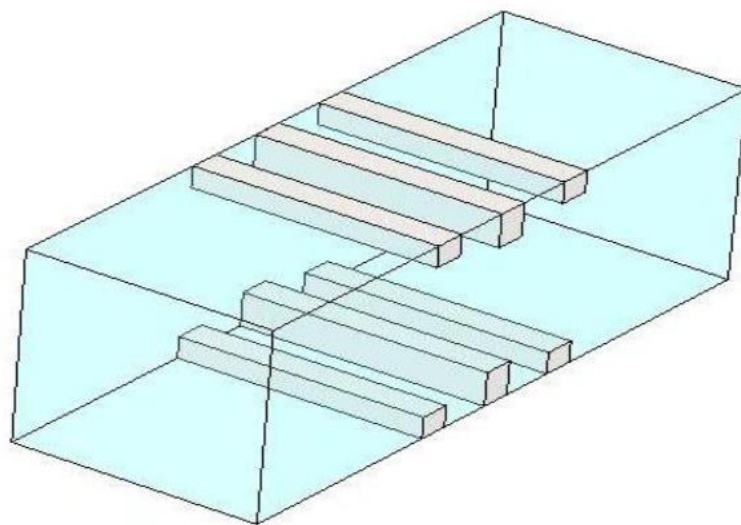


Рис. 3.17. Конструкція фазообертача на основі квадратного хвилеводу з трьома діафрагмами

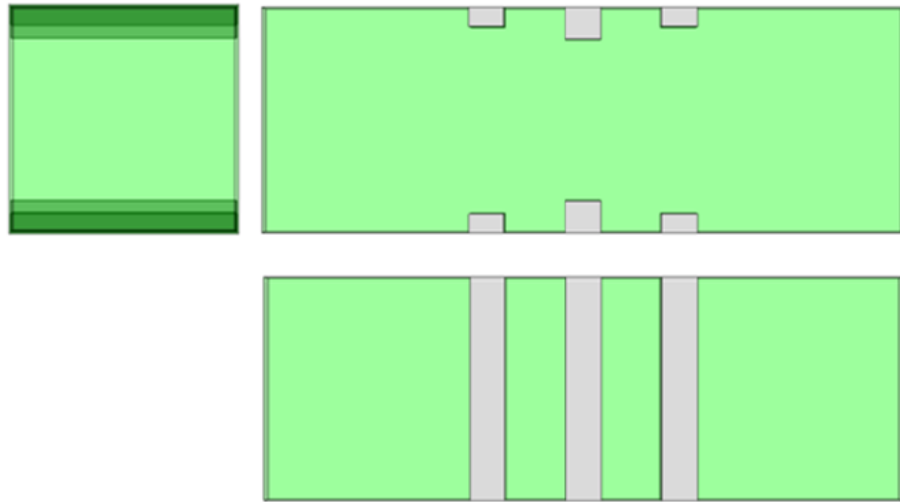


Рис. 3.18. Внутрішня структура фазообертача на основі квадратного хвилеводу з трьома діафрагмами

Використовуючи метод хвильових матриць та еквівалентних схем [22], було отримано основні параметри хвильової матриці пристрою фазового розсіювання.

$$[S_{\Sigma}] = \begin{bmatrix} S_{11.\Sigma} & S_{12.\Sigma} \\ S_{21.\Sigma} & S_{22.\Sigma} \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Таким чином, через елементи отриманої матриці розсіювання опуклостей визначено диференціальний фазовий зсув пристрою згідно з формулою:

$$\Delta\varphi = \varphi_{21.\Sigma L} - \varphi_{21.\Sigma C} \quad (3.5)$$

Коефіцієнт хвилі постійної напруги (КСХН) також був визначений згідно з аналітичним виразом:

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}. \quad (3.6)$$

Нижче представлені частотні залежності фазообертача на основі квадратного хвилеводу з трьома діафрагмами в робочому діапазоні частот 7–9

GHz для даного методу та двох відомих електродинамічних методів FDTD та FEM відповідно.

На рис. 3.19 наведено залежність диференціального фазового зсуву хвильоводного фазообертача в діапазоні частот 7-10 GHz. Як видно, диференціальний фазовий зсув пристрою становить $90^\circ \pm 5^\circ$ для даного методу, $90^\circ \pm 4^\circ$ для методу FDTD та $90^\circ \pm 6^\circ$ для методу FEM.

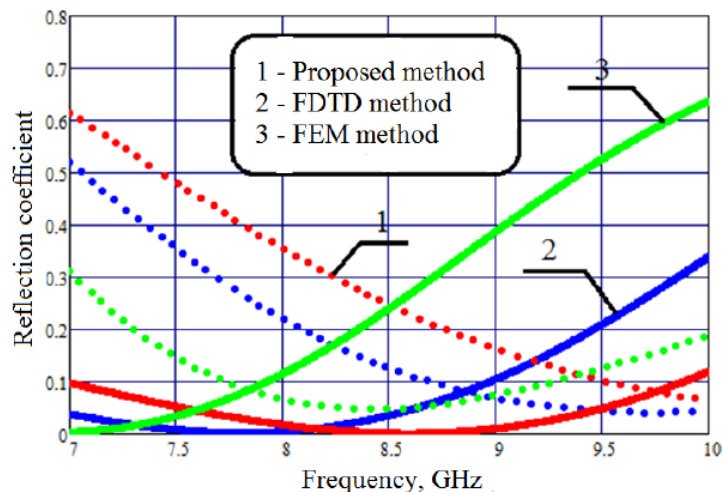


Рис. 3.19. Залежність коефіцієнта відбиття від частоти для обох поляризацій

Отже, результати проектування пристроїв за даним методом та відомими електродинамічними методами добре корелюють один з одним.

Так, у ході наукових досліджень було розроблено фазозсувний пристрій на основі квадратного хвильоводу з трьома діафрагмами в робочому діапазоні 7-10 ГГц. Запропонований пристрій підтримує диференціальний фазовий зсув $90^\circ \pm 5^\circ$. Пікове значення коефіцієнта відбиття для вертикальної та горизонтальної поляризацій становить 0,52 на частоті 7 ГГц. Отже, запропонований пристрій може бути використаний у сучасних фазованих антенних решітках.

3.7 Висновки до розділу 3

На основі вищеприведених досліджень технічних характеристик поляризаційних секцій виконані вимірювання КСХн, коефіцієнта еліптичності

та динамічних втрат, які засвідчили відповідність виміряних значень до стандартних технічних характеристик вузлів даного типу та теоретично розрахованих параметрів. Дані секції можна використовувати у антенно-хвильових трактах систем зв'язку (радіорелейних, супутникових, тропосферних, ефірно-кабельних).

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1. Вплив електромагнітних полів на організм людини

Вплив електромагнітних полів на організм людини є однією з найактуальніших проблем сучасності, оскільки стрімкий розвиток електронних технологій і широке використання радіоелектронних пристроїв призвели до значного зростання рівня електромагнітного навантаження на навколишнє середовище. Електромагнітні поля супроводжують людину всюди: під час користування мобільними телефонами, побутовою технікою, комп'ютерами, бездротовими мережами, транспортом і промисловим обладнанням. У зв'язку з цим організм людини безперервно зазнає впливу штучних джерел електромагнітного випромінювання, які накладаються на природний електромагнітний фон Землі. Питання безпеки такого впливу активно вивчається фахівцями в галузі медицини, біології, фізики та екології, адже електромагнітні поля здатні як спричиняти короточасні функціональні зміни в організмі, так і призводити до тривалих порушень у разі систематичної дії високих рівнів випромінювання.

Електромагнітне поле є особливою формою матерії, що утворюється навколо заряджених частинок і провідників, у яких протікає електричний струм. Воно характеризується напруженістю електричної та магнітної складових, а також частотою коливань, що визначає вид випромінювання. Усі електромагнітні хвилі поділяють на іонізуючі та неіонізуючі. До іонізуючого випромінювання належать рентгенівські та гамма-промені, здатні викликати іонізацію молекул у клітинах. Неіонізуюче випромінювання, до якого належать радіохвилі, мікрохвилі та випромінювання ліній електропередач, не викликає безпосереднього руйнування молекул, проте чинить теплову та біологічну дію.

Саме неіонізуючі електромагнітні поля становлять основний предмет дослідження в контексті впливу на здоров'я людини.

Однією з головних форм впливу електромагнітних полів на організм є тепловий ефект, що полягає у нагріванні тканин унаслідок поглинання енергії електромагнітних хвиль. Найбільше цьому впливу піддаються органи з високим вмістом води, насамперед мозок, очі, печінка та м'язові тканини. Надмірне локальне нагрівання може викликати порушення кровообігу, зміну обміну речовин і ушкодження клітин. Водночас, за порівняно низьких рівнів випромінювання, тепловий ефект може бути незначним, однак за тривалої дії навіть слабких полів можливі функціональні зміни в організмі.

Крім теплового, існує також нетепловий або біологічний вплив електромагнітних полів, який розглядається як більш потенційно небезпечний. Він проявляється у зміні електричних процесів у клітинах, порушенні передачі нервових імпульсів, зміні проникності клітинних мембран і можливому впливі на біохімічні процеси. Особливо чутливою до електромагнітних полів є нервова система людини, оскільки її робота безпосередньо пов'язана з електричною активністю. Дослідження свідчать, що тривалий вплив підвищених рівнів електромагнітних полів може спричиняти головний біль, втому, підвищену дратівливість, порушення сну та зниження концентрації уваги. У деяких випадках спостерігається ослаблення імунітету та загальне зниження працездатності.

Вплив електромагнітного випромінювання на серцево-судинну систему проявляється у зміні частоти серцевих скорочень і коливаннях артеріального тиску. За тривалої дії можуть виникати функціональні порушення серцевого ритму та погіршення стану судин. Значну стурбованість викликає також імовірний вплив електромагнітних полів на ендокринну систему, зокрема на функціонування щитоподібної залози та гіпоталамо-гіпофізарної системи, які відіграють важливу роль у регуляції гормонального балансу. Порушення гормональної регуляції може призвести до змін у метаболізмі, психоемоційному стані та загальному самопочутті людини.

В останні роки все більше уваги приділяється дослідженню впливу електромагнітних полів на репродуктивну систему людини. Існують дані, що тривалий вплив випромінювання високої частоти може негативно позначатися на якості сперми, зменшенні кількості рухливих сперматозоїдів і погіршенні репродуктивної функції. У жінок можливі порушення менструального циклу та загальні гормональні збої. Хоча результати наукових досліджень у цій сфері не є однозначними, питання безпеки мобільних пристроїв і радіотехнічного обладнання вимагає подальшого вивчення.

Особливо вразливою до впливу електромагнітних полів є дитяча нервова система, яка перебуває у стадії активного розвитку. Діти частіше користуються мобільними телефонами та бездротовими пристроями, тому можуть зазнавати тривалого впливу випромінювання. Вважається, що тканини дитячого мозку більш чутливі до електромагнітного впливу, а отже питання захисту дітей є надзвичайно актуальним.

З метою зниження негативного впливу електромагнітних полів розроблено санітарні норми й стандарти, які встановлюють допустимі рівні напруженості поля та потужності випромінювання. Дотримання цих норм є обов'язковим для підприємств зв'язку, радіомовлення, телебачення та виробників електронної техніки. Існують також рекомендації щодо раціонального користування мобільними телефонами, зокрема обмеження тривалості розмов, використання гарнітури, зменшення частоти контакту пристрою з головою та розміщення зарядних пристроїв на відстані від місця сну.

Також важливим аспектом є підвищення рівня обізнаності населення щодо правил безпечного користування пристроями, що випромінюють електромагнітні хвилі. Проведення просвітницьких заходів, інформування про можливі ризики та способи їх мінімізації сприяє формуванню відповідального ставлення до власного здоров'я. Сучасні технології мають служити людині, не завдаючи шкоди її організму, а тому розвиток наукових досліджень у сфері електромагнітної безпеки залишається важливим завданням.

Отже, електромагнітні поля є невід’ємною складовою сучасного життя, і повністю уникнути їх дії практично неможливо. Проте завдяки дотриманню норм безпеки, використанню сучасних засобів захисту та відповідальному ставленню до експлуатації побутових і професійних пристроїв можливо істотно зменшити негативний вплив. Усвідомлення потенційної небезпеки та вжиття профілактичних заходів дозволяє зберегти здоров’я та забезпечити гармонійне співіснування людини з техногенним середовищем.

4.2. Санітарно-захисна зона підприємства

Санітарно-захисна смуга – це зона розриву між промисловими підприємствами і сусідніми житловими чи громадськими будівлями. Ці смуги створюють для захисту житлових районів від шкідливого впливу промислових викидів, відокремлення сельбищних територій від ТЕЦ, складських територій, транспортних підприємств, залізничних станцій та ліній, портових зон, котелень, крупних бензозаправок тощо (рис. 9.1). Ширину санітарно-захисних зон в Україні встановлюють відповідно до діючого законодавства із такого розрахунку, щоби викиди промислових підприємств, які досягають районів житлової забудови, не перевищували встановлених гранично допустимих концентрацій (ГДК).

Ширину санітарно-захисних смуг встановлюють залежно від типів промислових підприємств і ступеню впливу їх викидів у оточуюче середовище. Для різних класів підприємств вона має бути не меншою, м:

- 1 клас – 1000;
- 2 клас – 500;
- 3 клас – 300;
- 4 клас – 100;
- 5 клас – 50.

Якщо дане підприємство розташоване в промисловій зоні з іншими підприємствами, які виділяють в атмосферу забруднюючі речовини,

архітектурно-планувальне рішення санітарно-захисної зони цього підприємства має брати до уваги сумарну кількість викидів. Деколи (наприклад, у випадку розташування житлової зони з підвітряного боку стосовно підприємства) ширина санітарно-захисних смуг може збільшуватися за рішенням органів санітарно-епідеміологічної служби.

Проект озеленення санітарно-захисних зон є складовою частиною проектною документації на будівництво підприємств і йому передують спеціальні дослідження із вивчення санітарно-гігієнічних і природно-кліматичних умов, архітектурно-планувальних рішень промислових підприємств і прилеглих до них територій, асортименту рослин тощо.

Основою для складання плану розміщення зелених насаджень є схема функціонального членування санітарно-захисної зони, в якій виділяють такі підзони:

1. промислова;
2. допоміжних виробництв;
3. транспортна;
4. господарсько-складських територій;
5. адміністративних будівель;
6. озеленення.

Проектується також зонування територій за ступенем та характером забруднення атмосферного повітря, що бере до уваги потужність і профіль підприємства, взаємне розташування джерел організованих і неорганізованих викидів, рельєфу місцевості, розу вітрів (особливо у вегетаційний період), мікрокліматичні умови. Виділяють три зони забруднення:

1. сильного постійного;
2. слабого постійного;
3. сильного періодичного.

В першій зоні концентрація основних викидів під час вегетаційного періоду перевищує гранично допустиму норму понад 50% днів, у другій – близько 5-10% днів (при цьому в решта часу шкідливі компоненти містяться в

нижчих концентраціях). Третій зоні притаманні рідкі (до 5% днів) викиди шкідливих речовин високої концентрації.

4.3. Оцінка впливу радіоактивного забруднення на технологічний процес виробництва і заходи захист

Джерела та характер радіоактивного забруднення:

- Природні джерела: радон, космічне випромінювання, природні радіонукліди у ґрунті та гірських породах.
- Техногенні джерела: аварії на атомних електростанціях, витоки з підприємств ядерного паливного циклу, використання радіоізотопів у медицині та промисловості.
- Вторинне забруднення: перенесення радіонуклідів через воду, повітря, ґрунт, що може призвести до їх накопичення у виробничих приміщеннях та технологічних лініях.

Радіаційне випромінювання може змінювати структуру матеріалів, викликати їх деградацію, порушувати електричні та теплові властивості. Це особливо небезпечно для електроніки, полімерів та високоточних приладів.

Персонал, який працює у зоні забруднення, піддається ризику опромінення. Це може призвести до зниження працездатності, збільшення кількості виробничих травм та помилок.

Технологічні ризики, які можуть трапитись:

- Порушення роботи систем автоматизації та контролю.
- Зниження якості продукції через потрапляння радіонуклідів у сировину.
- Виникнення додаткових витрат на очищення, утилізацію та контроль.

Методи оцінки впливу:

- Радіаційний моніторинг: вимірювання рівня гамма-випромінювання, концентрації радонового газу, аналіз проб повітря та води.
- Технологічний контроль: перевірка сировини та готової продукції на наявність радіонуклідів.
- Моделювання процесів: використання математичних моделей для прогнозування впливу забруднення на виробничі лінії.
- Санітарно-гігієнічна оцінка: визначення дозових навантажень на персонал та порівняння їх із нормативними значеннями.

Заходи захисту.

- Екранування виробничих приміщень спеціальними матеріалами (свинець, бетон).
- Використання систем вентиляції та фільтрації для зниження концентрації радіоактивних частинок.
- Автоматизація процесів для мінімізації контакту персоналу із забрудненими об'єктами.

Організаційні заходи.

- Регулярний контроль рівня радіації на підприємстві.
- Встановлення зон доступу та обмеження перебування працівників у небезпечних місцях.
- Проведення навчання персоналу щодо правил роботи у умовах радіаційного ризику.
- Використання спеціального одягу, респіраторів, дозиметрів.
- Медичний контроль та профілактичні огляди працівників.
- Забезпечення засобів екстреної допомоги у випадку перевищення дозових навантажень.

Радіоактивне забруднення призводить до значних економічних втрат: зниження продуктивності, необхідність додаткових інвестицій у захист та утилізацію, можливі штрафи за порушення екологічних норм. Соціальний

аспект полягає у збереженні здоров'я працівників та довіри суспільства до підприємства.

4.4. Впровадження заходів запобігання або зменшення ступення ураження, своєчасне надання допомоги на об'єкті галузі

Формування й оповіщення у сфері захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру є основним і головним невід'ємним елементом усієї системи заходів такого захисту. Інформацію становлять відомості про прогнозовані або виниклі надзвичайні ситуації з визначенням їх класифікації, меж поширення і наслідків, а також способи і методи реагування на них.

Центральні і місцеві органи виконавчої влади, виконавчі органи рад зобов'язані надавати населенню через засоби масової інформації оперативну і достовірну інформацію про стан захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій, про виникнення надзвичайних ситуацій, методи і способи їх захисту, уживання заходів щодо забезпечення безпеки.

Оповіщення про загрозу виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру та постійне інформування населення про них забезпечуються шляхом:

- завчасного створення і підтримки в постійній готовності загальнодержавної і територіальних автоматизованих систем централізованого оповіщення населення;
- організаційно-технічного об'єднання територіальних систем централізованого оповіщення і систем оповіщення на об'єктах господарювання;
- завчасного створення й організаційно-технічного об'єднання із системами спостереження і контролю постійно діючих локальних систем оповіщення й інформування населення в зонах можливого катастрофічного затоплення, районах розміщення радіаційних і хімічних підприємств, інших об'єктів підвищеної небезпеки;

- централізованого використання загальнодержавних і галузевих систем зв'язку, радіопровідного, телевізійного оповіщення, радіотрансляційних мереж та інших технічних засобів передачі інформації.

З метою своєчасного захисту населення і території від надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру, запобігання і реагування на них відповідними центральними і місцевими органами виконавчої влади здійснюються:

- створення і підтримка в постійній готовності загальнодержавної і територіальних систем спостереження і контролю з включенням у них існуючих сил і засобів контролю;

- організація збору, обробки і передачі інформації про стан навколишнього середовища, забруднення харчових продуктів, продовольчої сировини, фуражу, води радіоактивними, хімічними речовинами, мікроорганізмами й іншими біологічними агентами.

Укриттю в захисних спорудах, у разі потреби, підлягає населення відповідно до його приналежності до груп (працююча зміна, населення, яке проживає в небезпечних зонах).

Створення фонду захисних споруд забезпечується шляхом:

- комплексного освоєння підземного простору міст і населених пунктів для взаємопогоджуваного розміщення в ньому споруд і приміщень соціально-побутового, воєнного і господарського призначення з урахуванням необхідності пристосування і використання частини приміщень для укриття населення у випадку виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру;

- обстеження й узяття на облік підземних і наземних будівель і споруд, які відповідають вимогам захисту споруд підземного простору міст, гірничих виробок і природних пустот;

- дообладнування з урахуванням реальної обстановки підвальних й інших заглиблених приміщень;

- будівництва заглиблених споруд, окремо розташованих від об'єктів виробничого призначення і пристосованих для захисту;

- масового будівництва в період загрози виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру найпростіших сховищ і укриттів;

- будівництва окремих сховищ і протирадіаційних укриттів. Перелік таких сховищ, укриттів та інших захисних споруд, які

необхідно будувати, щорічно визначається спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади, до компетенції якої віднесені питання захисту населення і територій від надзвичайної ситуації техногенного і природного характеру, і затверджуються Кабінетом Міністрів України.

Наявний фонд захисних споруд використовується для господарських, культурних і побутових потреб у порядку, що визначається спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади, до відання якої віднесені питання захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру, і затверджується Кабінетом Міністрів України.

Евакуаційні заходи.

В умовах неповного забезпечення захисними спорудами в містах та інших населених пунктах, які мають об'єкти підвищеної небезпеки, основним засобом захисту є евакуація населення і розміщення його в зонах, безпечних для проживання людей і тварин.

Евакуації підлягає населення, що проживає в населених пунктах, розташованих у зонах можливого катастрофічного затоплення, можливого небезпечного радіоактивного забруднення, хімічного ураження, у районах виникнення стихійних лих, аварій і катастроф (якщо виникає безпосередня загроза життю і здоров'ю людей).

У залежності від обстановки, що склалася під час надзвичайної ситуації техногенного і природного характеру, може бути проведена загальна чи часткова евакуація населення тимчасового чи безповоротного характеру.

Загальна евакуація проводиться за рішенням Кабінету Міністрів України для всіх категорій населення і планується на випадок:

- можливого небезпечного радіоактивного забруднення територій навколо атомних електростанцій (якщо виникає безпосередня загроза життю і здоров'ю людей, які проживають у зоні ураження);
- виникнення загрози катастрофічного затоплення місцевості з чотиригодинним доходженням проривної хвилі.

Часткова евакуація проводиться за рішенням Кабінету Міністрів України у випадку загрози чи виникнення надзвичайної ситуації техногенного і природного характеру.

При проведенні часткової евакуації завчасно вивозиться не зайняте у сферах виробництва й обслуговування населення: діти, учні навчальних закладів, вихованці дитячих будинків разом з викладачами і вихователями, студенти, пенсіонери й інваліди, що містяться в будинках для осіб похилого віку, разом з обслуговуючим персоналом і членами їх родин.

У сфері захисту населення і території від надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру евакуація населення планується на випадок:

- аварії на атомній електростанції з можливим забрудненням території;
- усіх видів аварій з викидом сильнодіючих отруйних речовин;
- загрози катастрофічного затоплення місцевості;
- лісових і торф'яних пожеж, землетрусів, зсувів, інших геофізичних і гідрометеорологічних явищ з тяжкими наслідками, які загрожують населеним пунктам.

Проведення організованої евакуації, запобігання проявів паніки і недопущення загибелі людей забезпечується шляхом:

- планування евакуації населення;
- визначення зон, придатних для розміщення евакуйованих з потенційно небезпечних зон;

- організації оповіщення керівником підприємств і населення про початок евакуації;
- організації управління евакуацією;
- усебічного життєзабезпечення в місцях безпечного розселення евакуйованого населення;
- навчання населення діям при проведенні евакуації.

Евакуація населення проводиться способом, який передбачає вивезення основної частини населення із зон надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру усіма видами наявного транспорту, а у випадку його відсутності чи недостатчі (а також у випадку руйнування транспортних шляхів) — організоване виведення населення пішки за заздалегідь розробленими маршрутами.

При проектуванні й експлуатації споруд та інших об'єктів господарювання, наслідки діяльності яких можуть шкідливо вплинути на безпеку населення і навколишнього середовища, обов'язково розробляються і здійснюються заходи інженерного захисту з метою запобігання виникнення надзвичайної ситуації техногенного і природного характеру.

Заходи інженерного захисту населення і території повинні передбачати:

- облік при розробці генеральних планів забудови населених пунктів і веденні містобудування можливих проявів в окремих регіонах і на окремих територіях небезпечних та катастрофічних явищ;
- раціональне розміщення об'єктів підвищеної небезпеки з урахуванням можливих наслідків їх діяльності у випадку виникнення аварій для безпеки населення і навколишнього середовища;
- будівництво будинків, будівель, споруд, інженерних мереж і транспортних комунікацій із заданими рівнями безпеки і надійності;
- розробку і впровадження заходів безаварійного функціонування об'єктів підвищеної небезпеки;
- створення комплексної схеми захисту населених пунктів і об'єктів господарювання від небезпечних природних процесів;

- розробку і здійснення регіональних та місцевих планів запобігання й ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру;
- організацію будівництва протизсувних, протипаводкових, протиселевих, протилавинних, протиерозійних та інших інженерних споруд спеціального призначення;
- реалізацію заходів санітарної охорони території.

Медичний захист

Заходи запобігання чи зменшення ступеня ураження людей, своєчасного надання медичної допомоги постраждалим і їх лікування, забезпечення епідемічного благополуччя в зонах надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру повинні передбачати:

- планування і використання існуючих сил і засобів установ охорони здоров'я незалежно від форм власності і господарювання;
- введення в дію національного плану соціально-психологічних заходів при виникненні і ліквідації надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру;
- розгортання в умовах надзвичайної ситуації техногенного і природного характеру необхідної кількості лікувальних установ;
- завчасне застосування профілактичних медичних препаратів і санітарно-епідеміологічних заходів;
- контроль за якістю харчових продуктів і продовольчої сировини, питною водою і джерелами водопостачання;
- контроль за станом атмосферного повітря й опадів;
- завчасне створення і підготовку спеціальних медичних формувань;
- нагромадження медичних засобів захисту, медичного і спеціального майна й техніки;
- контроль за станом навколишнього середовища, санітарно-гігієнічною й епідемічною ситуацією;

– підготовку медичного персоналу і загальне медико-санітарне навчання населення.

Для надання безкоштовної медичної допомоги потерпілим від надзвичайної ситуації техногенного і природного характеру громадянам, рятувальникам і особам, які беруть участь у ліквідації надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру, діє Державна служба медицини катастроф як особливий вид державних аварійно-рятувальних служб. Державна служба медицини катастроф складається з медичних сил і засобів та лікувальних установ центрального і територіального рівнів незалежно від виду діяльності і галузевої приналежності, визначених центральним органом виконавчої влади з питань охорони здоров'я за узгодженням зі спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади, до компетенції якого віднесені питання захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру, з питань оборони, з питань внутрішніх справ, з питань транспорту, Радою Міністрів Автономної Республіки Крим, обласними, Київською і Севастопольською міськими державними адміністраціями. Координацію діяльності Державної служби медицини катастроф на випадок виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру здійснюють спеціальні комісії загальнодержавного (регіонального, місцевого, об'єктового) рівня, утворені згідно із Законом. Організаційно-методичне керівництво Державною службою медицини катастроф здійснюється центральним органом виконавчої влади з питань охорони здоров'я.

Положення про Державну службу медицини катастроф розробляється центральним органом виконавчої влади з питань охорони здоров'я і спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади, до компетенції якого віднесені питання захисту населення і території від надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру, і затверджується Кабінетом Міністрів України.

Постраждалому населенню, особливо дітям, а також залученим до виконання аварійно-рятувальних робіт у випадку виникнення надзвичайної ситуації техногенного і природного характеру за висновками Державної служби медицини катастроф чи лікарняно-трудової комісії, рятувальникам аварійно-рятувальних служб лікарями підрозділів аварійно-рятувальних служб надається гарантоване забезпечення відповідним лікуванням і психологічним відновленням у санітарно-курортних установах, при яких створені центри медико-психологічної реабілітації.

Центри медико-психологічної реабілітації створюються при діючих санаторно-курортних установах. Перелік центрів медико-психологічної реабілітації, порядок проходження медико-психологічної реабілітації, положення про медико-психологічну реабілітацію, відповідність санітарно-курортних установ вимогам медико-психологічної реабілітації щорічно визначаються у відповідних положеннях, розроблюваних центральним органом виконавчої влади з питань охорони здоров'я і затверджуваних спеціально уповноваженим центральним органом виконавчої влади, до компетенції якого віднесені питання захисту населення і території від надзвичайної ситуації техногенного і природного характеру.

Захист від біологічних засобів ураження включає своєчасне виявлення факторів біологічного ураження в залежності від їх виду і ступеня ураження, проведення комплексу адміністративно-господарських режимно-обмежувальних і спеціальних протиепідемічних і медичних заходів.

Біологічний захист передбачає:

- своєчасне використання колективних та індивідуальних засобів захисту;
- введення режимів карантину і обсервації;
- знезаражування вогнища ураження;
- необхідне знезаражування людей, тварин і т.п.;
- своєчасну локалізацію зони біологічного ураження;
- проведення екстреної і специфічної профілактики;

- дотримання протиепідемічного режиму підприємствами, установами та організаціями незалежно від форм власності й господарювання і населенням.

Радіаційний і хімічний захист.

Радіаційний і хімічний захист включає заходи для виявлення й оцінки радіаційної, хімічної обстановки, організацію і здійснення дозиметричного і хімічного контролю, розробку типових режимів радіаційного захисту, забезпечення засобами індивідуального і колективного захисту, організацію і проведення спеціальної обробки.

Виконання вимог радіаційного і хімічного захисту забезпечується шляхом:

- завчасного нагромадження і підтримки в готовності засобів індивідуального захисту та приладів дозиметричного і хімічного контролю, обсяги і місця збереження яких визначаються відповідно до встановлених зон небезпеки, забезпечення вказаними засобами насамперед особового складу формувань, які беруть участь у проведенні аварійно-рятувальних й інших невідкладних робіт у вогнищах ураження, а також персоналу радіаційно і хімічно небезпечних об'єктів господарювання і населення, що проживає в зонах небезпечного зараження і навколо них;
- своєчасного впровадження заходів, способів і методів виявлення й оцінки масштабів та наслідків аварій на радіаційно і хімічно небезпечних об'єктах господарювання;
- створення уніфікованих засобів захисту приладів і комплектів дозиметричного й хімічного контролю;
- надання населенню можливостей купувати в установленому порядку в особисте користування засобів індивідуального захисту і дозиметрів;
- завчасного пристосування об'єктів побутового обслуговування і транспортних підприємств для проведення санітарної обробки людей і спеціальної обробки одягу, майна і транспорту;

- розробки загальних критеріїв, методів і методик спостережень щодо оцінки радіаційної і хімічної обстановки;
- завчасного створення і використання засобів колективного захисту населення від радіаційної і хімічної небезпеки;
- пристосування наявних засобів колективного захисту від інших видів загрози для захисту від радіаційної і хімічної небезпеки.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було розглянуто та узагальнено методику проєктування хвилевідних фазовертачів, призначених для роботи в надвисокочастотному діапазоні. Проведений аналіз підтвердив, що фазовертачі є ключовими функціональними елементами НВЧ-трактів, зокрема антенно-хвилеводних систем, де вони забезпечують формування заданих фазових співвідношень сигналів без істотного погіршення енергетичних характеристик.

У першому розділі визначено основне призначення фазовертачів, проаналізовано принципи їх функціонування та особливості реалізації на основі прямокутних хвилеводів. Показано, що широкосмугові хвилевідні фазовертачі забезпечують високу електричну міцність, малі втрати та стабільність фазових характеристик у широкій смузі частот, що робить їх доцільними для використання в сучасних НВЧ-системах.

У другому розділі розглянуто конструктивні рішення коаксіально-хвилеводних переходів і структури фіксованих фазовертачів, а також методи аналізу та синтезу електродинамічних систем. Особливу увагу приділено фізичним процесам, що виникають у НВЧ-пристроях, зокрема в умовах космічного середовища, що є важливим для забезпечення надійності та стабільності роботи фазовертачів у складних експлуатаційних умовах.

У науково-дослідній частині виконано класифікацію фазуючих пристроїв та проаналізовано різні типи хвилевідних фазовертачів, зокрема конструкції з діелектричними пластинами, металевими вставками, електронно-регульовані діодні фазовертачі, відбивні фазовертачі з дискретним керуванням, а також пристрої на феритових елементах. Показано, що вибір конкретної структури фазовертача визначається вимогами до робочого частотного діапазону, точності фазового зсуву, швидкодії, втрат і можливості керування. Запропонований фазовий зміщувач на 90° на основі квадратного хвилеводу з діафрагмами підтверджує ефективність хвилевідних рішень для реалізації точних фазових зсувів.

У розділі з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях розглянуто вплив електромагнітних полів на організм людини, санітарно-захисні вимоги до виробництва НВЧ-пристроїв та заходи захисту персоналу в умовах можливого радіоактивного забруднення. Це підкреслює необхідність комплексного підходу до проєктування, який враховує не лише технічні, а й безпекові аспекти.

Загалом результати роботи підтверджують, що хвилевідні фазоповертачі залишаються ефективним та надійним засобом керування фазою НВЧ-сигналів. Розроблена та проаналізована методика проєктування дозволяє забезпечити оптимальне узгодження, необхідну електричну міцність і стабільність фазових характеристик, що є підґрунтям для їх застосування у сучасних радіотехнічних, телекомунікаційних і космічних системах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Milligan T.A. Modern antenna design, John Wiley & Sons, New Jersey 2005, 945 p.
2. Stutzman W.L. Polarization in Electromagnetic Systems, Artech House, Norwood 2018, 352 p.
3. Zhuk S.Ya. Synthesis of extremely wide stopband E-plane bandpass filters / S.Ya. Zhuk, M.Y. Omelianenko, T.V. Romanenko, O.V. Tureeva // Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. – 2021. – Vol. 84. – pp. 22-29. DOI: 10.20535/RADAP.2021.84.22-29.
4. Чухов В. В. Радіочастотні методи та засоби вимірювань параметрів хвильоводів із діелектричним заповненням: автореф. дис. на наук. ступінь к.т.н. Вінниц. нац. техн. ун-т. 2007.
5. Chen, Q.; Li, L.; Zhang, Y.; Fan, Y.; Yang, J. Design of W-band passive millimeter wave imaging system. In Proceedings of the 2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings, Kaohsiung, Taiwan, 4–7 December 2012; pp. 1025–1027. [Google Scholar] [CrossRef]
6. Spence, T.; Cooley, M.; Stenger, P.; Park, R.; Li, L.; Racette, P.; Heymsfield, G.; Mclinden, M. Concept design of a multi-band shared aperture reflectarray/reflector antenna. In Proceedings of the 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 18–21 October 2016; pp. 1–6. [Google Scholar] [CrossRef]
7. Harrington, R.F. Field Computation by Moment Method; Macmillan: New York, NY, USA, 1968; ISBN 978-047-054-463-1. [Google Scholar]
8. Jin, J.-M. The Finite Element Method in Electromagnetics, 3rd ed.; Wiley-IEEE Press: Hoboken, NJ, USA, 2014; ISBN 978-1-118-57136-1. [Google Scholar]
9. Taflov, A.; Hagness, S.C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd ed.; Artech House: Boston, MA, USA, 2005; ISBN 978-158-053-832-9. [Google Scholar]

10. Ames, W.F. Numerical Methods for Partial Differential Equations, 2nd ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 1977; ISBN 978-012-056-760-7. [Google Scholar]
11. Weiland, T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. Arch. Elektron. Uebertragungstechnik 1997, 31, 116–120. [Google Scholar]
12. Deschamps, G.A. Ray techniques in electromagnetics. Proc. IEEE 1972, 60, 1022–1035. [Google Scholar] [CrossRef]
13. Luneburg, R.K. Mathematical Theory of Optics; University of California Press: Berkeley, CA, USA, 1966. [Google Scholar]
14. Lorenzo, J.A.M.; Pino, A.G.; Vega, I.; Arias, M.; Rubinos, O. ICARA: Induced-current analysis of reflector antennas. IEEE Antennas Propag. Mag. 2005, 47, 92–100. [Google Scholar] [CrossRef]
15. Bennett, C.A. Principles of Physical Optics; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2022. [Google Scholar]
16. Arias-Acuña, M.; García-Pino, A.; Rubiños-López, O. Fast far field computation of single and dual reflector antennas. J. Eng. 2013, 2013, 140254. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Rahmat-Samii, Y. A comparison between GO/aperture-field and physical-optics methods of offset reflectors. IEEE Trans. Antennas Propag. 1984, 32, 301–306. [Google Scholar] [CrossRef]
18. Huang, J.; Zhou, J.; Deng, Y. Near-to-far field RCS calculation using correction optimization technique. Electronics 2023, 12, 2711. [Google Scholar] [CrossRef]
19. Keller, J.B. Geometrical Theory of Diffraction. J. Opt. Soc. Am. 1962, 52, 116–130. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
20. Ufimtsev, P.Y. Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2014; ISBN 978-1-118-75366-8. [Google Scholar]

21. Wang, Y.; Pang, C.; Wang, Q.; Mu, Y.; Cheng, Y.; Qi, J. Phase-only compact radiation-type metasurfaces for customized far-field manipulation. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2023, 71, 4119–4128. [Google Scholar] [CrossRef]
22. Chu, H.; Qi, J.; Qiu, J. Dipole-based wavelet superposition for accurate design and analysis of metasurface. *IEEE Photonics J.* 2020, 12, 4601312. [Google Scholar] [CrossRef]
23. Berry, D.; Malech, R.; Kennedy, W. The reflectarray antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1963, 11, 645–651. [Google Scholar] [CrossRef]
24. Orfanidis, S.J. *Electromagnetic Waves and Antennas*. Available online: <https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/> (accessed on 7 February 2024).
25. Balanis, C.A. *Advanced Electromagnetics*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2012; ISBN 9780470589489. [Google Scholar]
26. Balanis, C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2016; ISBN 9781118642061. [Google Scholar]
27. Химич Г. П. Супутникові системи телекомунікацій на основі технологій 4g - 5g / Г. П. Химич, В. Л. Дунець // Матеріали міжнародної наукової конференції „Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України“ (до 175-ліття від дня народження), 28-30 вересня 2020 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2020. — С. 106–107. — (Важливі аспекти практичного застосування здобутків сучасної науки і новітніх технологій).
28. Дунець В. Л. Математична модель та метод опрацювання електрокардіосигналу при фізичному навантаженні для підвищення точності кардіодіагностичних систем / Дунець В.Л. . — Тернопіль , 2013 — 20 с. — Режим доступу: <http://>
29. Дунець В.Л. Математична модель та метод опрацювання електрокардіосигналу при фізичному навантаженні для підвищення точності кардіодіагностичних систем. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи / В.Л.Дунець — Тернопіль, 2013. — 22 с.

30. Дунець В.Л., Хвостівський М.О., Сверстюк А.С., Хвостівська Л.В. Математичне та алгоритмічно-програмне забезпечення опрацювання електрокадіосигналів при фізичному навантаженні у кардіодіагностичних системах: наукова монографія. Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2022. 136 с.

31. Dunets V. L. Алгоритм оцінювання завадозахищеності каналу зв'язку / В. Л. Дунець, Н. І. Шилівський, О. Ю. Щирба, Д. О. Гуменюк, Т. В. Чирський // XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 7-8 грудня 2022 року. — Т. : ТНТУ, 2022. — С. 162. — (Комп'ютерно-інформаційні технології та системи зв'язку).

32. Математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення оцінювання завадозахищеності каналів зв'язку з балансною модуляцією / ВЛ Дунець, ЛВ Хвостівська, ЮБ Паляниця - Збірник наукових праць Вісник НУВГП, серія технічні ..., 2023.

33. The method of using fractal analysis for metastatic nodules diagnostics on computer tomographic images of lungs / SV Romaniv, YB Palaniza, DV Vakulenko... - 2023.

34. Основи охорони праці. / Під ред. Ткачука К.Н., Халімовського Н.О. – К.: Основа, 2006

35. Грибан В.Г., Негодченко О.В. Охорона праці. – К.: Центр учбової літератури, 2009

36. Толок А.О., Крюковська О.А. Безпека життєдіяльності. Навчальний посібник. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011

37. Стручок В. С. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ» / Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 159 с.

38. Стручок В. С. Навчальний посібник «ТЕХНОЕКОЛОГІЯ ТА ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА. ЧАСТИНА «ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА» / Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.

39. Методичні рекомендації до виконання, оформлення та захисту кваліфікаційних робіт для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» галузі знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»/уклад.: Дунець В.Л., Хвостівська Л.В., Дедів І.Ю. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 56 с.

40. Mathematical and Algorithmic Support of Detection Useful Radiosignals in Telecommunication Networks. L. Khvostivska, M. Khvostivsky, V. Dunets, I. Dediv. CEUR Workshop Proceedings. 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2022 Ternopil 22-24 November 2022. Vol 3309, с. 314-318.

41. Khvostivsky M.O., Pankiv I.M., Fuch O.V., Khvostivska L.V., Boyko R.R., Dunets V.L., Kartashov V.V. Method and Algorithm of Electroencephalographic Signals Processing in Computer Medical Diagnostic Systems for Human Psychoemotional Indicators Detection. Visnyk NTUU KPI Seriiia - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, Issue:91, 2023. pp.63-71.

42. Yurii Palianytsia, Vasyl Dunets, Liliia Khvostivska. Modeling of Phased Array Antenna for Data Transmission in Urban Environment. CEUR Workshop Proceedings. 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2023. Ternopil 22 November 2023 до 24 November 2023. Vol 3628, с. 208-220.

43. Dual-Polarization Yagi Antenna for Meter Wavelength Range. Khymych H., Dunets V., Duda S., Palaniza Y., Kornieiev K. Radioelectronics and Communications Systems. Allerton Press Inc. United States. 2023. Volume 66. Issue 11, pp. 609–615.

44. Khymych, H., Dunets, V., Duda, S., Palaniza, Y., Kornieiev, K. Dual-Polarization Yagi Antenna for Meter Wavelength Range. Radioelectronics and

Communications Systems, 66(11), pp. 609–615. 2023
<https://radio.kpi.ua/article/view/S0021347022080039>.

45. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunets V., Dediv I. Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio signals in electronic communication networks with noises. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 111, no 3, 2023. pp. 48–57. <https://visnyk.tntu.edu.ua/?art=737>.

46. Паляниця Ю., Дунець В., Дедів І., Хвостівська Л., Сверстюк А. Розвиток концепції Smart Systems та Mobility as a Service: тенденції останнього десятиліття. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні наук. Том 349. № 2. 2025. С. 549-560. Галузь науки: технічні (17.03.2020) Категорія: Б.

ДОДАТКИ

Діапазони частот згідно класифікації IEEE

Діапазони частот		
Назва	Частотний діапазон, ГГц	
Назва діапазону	Діапазон частот РЛС	Діапазон частот в супутниковому зв'язку
L	1,0 – 2,0	
S	2,0 – 4,0	
C	4,0 – 8,0	4,0 – 7,0
X	8,0 – 12,0	7,0 – 10,7
Ku	12,0 – 18,0	10,7 – 18,0
K	18,0 – 26,5	18,3 – 20,2; 27,5 – 31,5
Ka	26,5 – 40,0	

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Маріборський університет (Словенія)
Технічний університет у Кошице (Словаччина)
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)
Краківський економічний університет (Польща)
Вроцлавський економічний університет (Польща)
Університет «Опольська Політехніка» (Польща)
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Вінницький національний аграрний університет
Львівський національний університет ім. І. Франка
Головне управління Пенсійного фонду в Тернопільській області
Наукове товариство ім. Шевченка
Тернопільський обласний комунальний інститут післядипломної педагогічної освіти
Сумський державний педагогічний університет
Запорізький національний університет

АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Збірник

тез доповідей

**XIV Міжнародної науково-технічної
конференції молодих учених та студентів**

11-12 грудня 2025 року



**УКРАЇНА
ТЕРНОПІЛЬ – 2025**

УДК 62:004:338
А43

Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIV міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11-12 грудня 2025) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2025 – 593.

Actual problems of modern technologies: book of abstracts of the XIV International scientific and practical conference of young researchers and students, (Ternopil, December, 11th-12th, 2025) / Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil Ivan Puluj National Technical University [and other.]. – Ternopil: PE Palanytsia V.A., 2025. – 593.

ISBN 978-614-8751-08-1

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Голова: Микола Митник – ректор ТНТУ ім. І. Пулюя (Україна)

Заступник голови: Павло Марущак – проректор з наукової роботи ТНТУ ім. І. Пулюя (Україна)

Члени: Томаш Вухерер (Словенія), Ян Вінаш (Словаччина), Олегас Прентковскіс (Литва), Анетта Зелінська (Польща), Діана Рокіта-Поскарт (Польща), Бригіда Клеменс (Польща), Марцін Завіцкі (Польща), Олександр Андрейків (Україна), Інна Кульчій (Україна), Світлана Коляденко (Україна), Віктор Кравецький (Україна), Наталія Ілляшенко (Україна), Ірина Дашко (Україна)

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Ціх Г., Баран І., Карташов В., Лещук Р., Золотий Р., Окіпний І., Мочарський В., Тимошик Н., Маркович І.

Науковий секретар: Наталія Тимошик

Адреса оргкомітету: ТНТУ ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, 46001

Редагування, оформлення, верстка: Маркович І., Тимошик Н.

СЕКЦІЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

Секція 1. Фізико-технічні основи розвитку нових технологій

Секція 2. Нові матеріали, міцність і довговічність елементів конструкцій

Секція 3. Сучасні технології в будівництві, машино- та приладобудуванні

Секція 4. Сучасні технології на транспорті

Секція 5. Комп'ютерно-інформаційні технології та системи зв'язку

Секція 6. Електротехніка та енергозбереження

Секція 7. Фундаментальні проблеми харчових біо- та нанотехнологій

Секція 8. Економічні та соціальні аспекти нових технологій

@ТНТУ ім. І. Пулюя

ISBN 978-614-8751-08-1

За достовірність поданих до друку матеріалів відповідальність несуть автори

УДК 621.372.8

Г.П. Химич, ст. викл.; О.М. Опашний, студент; Р.І. Кондра, студент

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛЕВІДНИХ НВЧ СТРУКТУР З НЕОДНОРІДНОСТЯМИ У ХВИЛЕВОДАХ

H.P. Khymych, senior lecturer; O.M. Opashnyy, student; R.I. Kondra, student

RESEARCH OF MICROWAVEGUIDE STRUCTURES WITH INHOMOGENEITIES IN THE WAVEGUIDES

У даній публікації приведені результати розрахунків та вимірів спроектованих кількох варіантів широкосмгових хвильоводних фазоповертачів, рис.1 та хвильоводних багатофункціональних фільтрів, рис.2, які використовуються в інтегрованому антенному надвисокочастотному (НВЧ) тракті з метою первинної обробки електромагнітних хвиль (розділення за поляризацією, частотними смугами, фазове узгодження каналів, узгодження між елементами тракту).

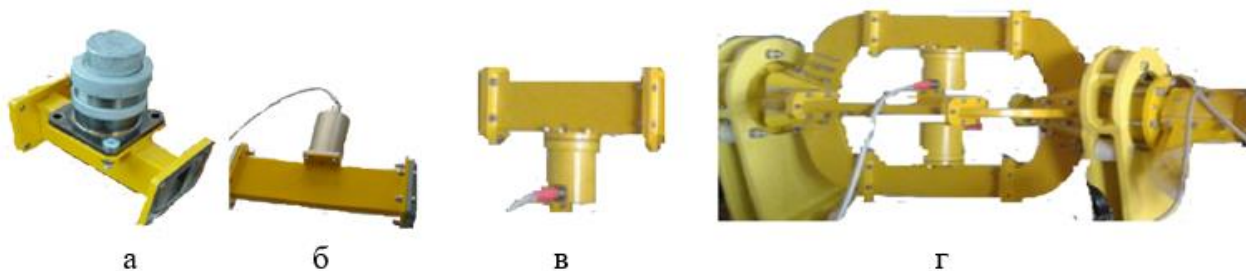


Рисунок 1. Натурні взірці фазоповертачів: а – з механічною зміною фази;

б – з електромеханічною зміною фази; в – з електричною (програмованою) зміною фази; г – електричні фазоповертачі у каналах інтегрованого антенного тракту НВЧ С/Ки діапазонів.

Дані хвильовідні фазоповертачі виконані на основі хвильоводів перетином 61×10 мм з встановленою всередині діелектричною пластиною (teflon 4). У фазоповертачі змінюється електрична довжина, змінюючи при цьому фазову складову електромагнітної хвилі основної моди H_{10} , яка проходить через хвильовід. Всередині хвильоводу розташовується по висі хвильоводу діелектрична пластина з малими втратами і спеціальними скосами на краях для забезпечення хорошого узгодження з сусідніми елементами (вузлами) в НВЧ тракті. Така конструкція дає можливість плавно змінювати фазовий зсув механічно, електрично

або програмно. Зміна ширини хвильоводу змінює критичну довжину хвилі $\lambda_{кр.} = 2a$ і фазову швидкість хвилі H_{10} (зменшення розмірів хвильоводу зменшує затримку фази). Для розрахунку складових частин фазоповертача використовувався метод суперпозиції елементарних хвиль. У відповідності до графіків, рис.2 а,б, розраховувались геометричні та діелектричні параметри у відповідності до зміни критичної частоти.

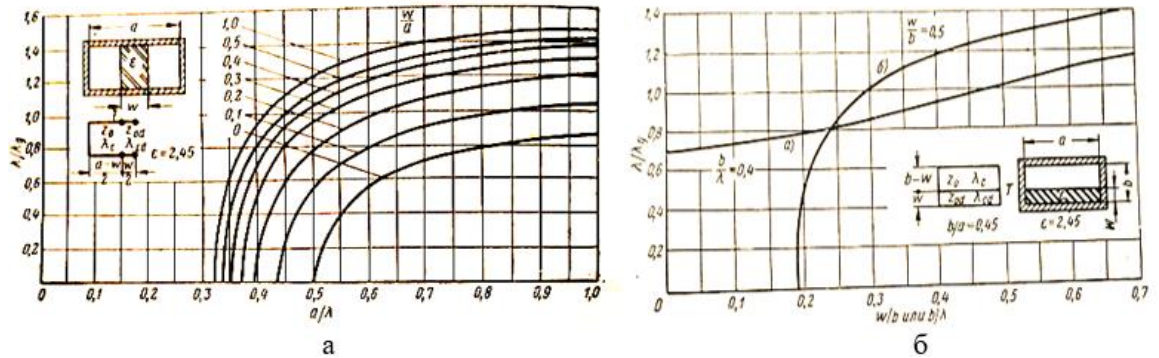


Рисунок 2. Прямокутний хвильвід з діелектричною пластиною: а – паралельна електричному полю; б – перпендикулярна електричному полю.

Результати вимірів VSWR (коефіцієнт стоячої хвилі) фільтрів показано на рис.3.

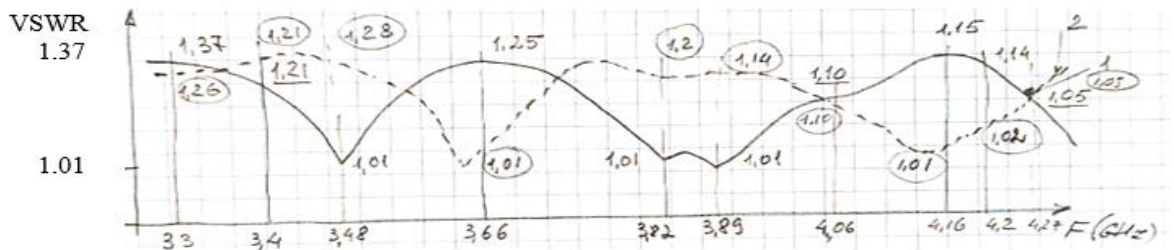


Рисунок 3. Значення VSWR при крайніх положеннях діелектричної пластини.

На рис. 4. показано хвильвідний широкопasmовий смуго-пропускний НВЧ фільтр, який створений на основі прямокутного хвильоводу, перетином 61×10 мм. Даний фільтр є широкопasmовий. VSWR такого фільтру показано на рис 5. Вимірювання проводились на 4 взірцях, що демонструють високу технологічність, точність виготовлення та налаштування взірців. Коефіцієнт втрат в робочій смuзі частот не більше 0,15 dBi, затухання за межею робочої зони фільтру – понад мінус 32 dBi, коефіцієнт узгодження (відбиття) від входу і виходу, не більше 1,19.

Розрахунок і синтез фільтру даного типу зводиться до еквівалентної схеми низькочастотного прототипу, який задовільняє відповідну частотну характеристику, з заміною зосереджених елементів схеми на відповідні еквіваленти надвисоких частот. У якості елементів відрізків лінії передачі, які відповідають ємностям, індуктивностям та

резонансним контурам використовуються стрижні, розміщені на широкій стінці хвилеводу. Довжина стрижня менше $\lambda/4$ є еквівалентом індуктивності, при довжині більше $\lambda/4$ є еквівалентом ємності. З'єднання реактивних елементів (стрижнів) з корпусом хвилеводу виконані так, що додаткові реактивності є мінімальними і на налаштування фільтру не впливають.



Рисунок 4. Натурні взірці гібридних смугово-пропускних фільтрів НВЧ.

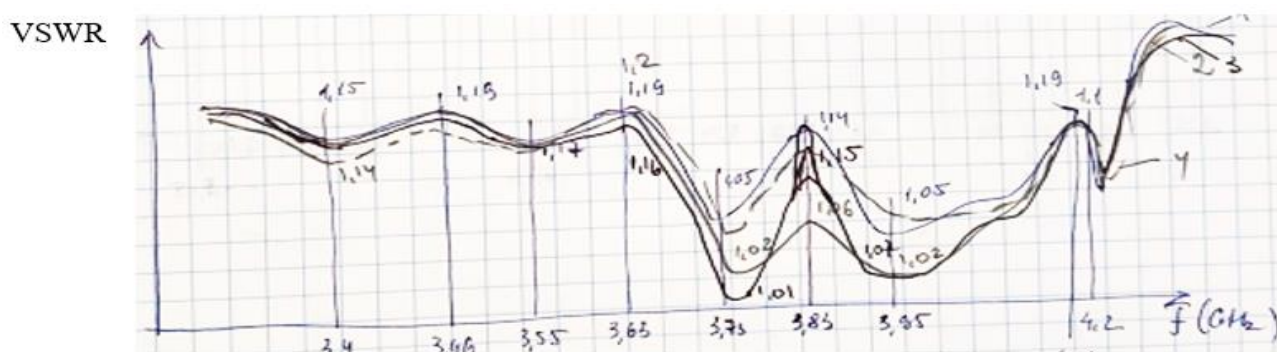


Рисунок 5. КСХН (VSWR) смугово-пропускних фільтрів.

Література

1. [Безбородов Ю. М. Фільтри НВЧ на діелектричних резонаторах / Ю. М. Безбородов, Т. Н. Нариткін, В. Б. Федоров. – Київ. Техніка, 1989.](#)
2. В. В. Козловський. Синтез пристроїв НВЧ на неоднорідних лініях. В. І. Сошніков, В. А. Бичковський, – Київ. Техніка, 1991.
3. [Місюра А.О. Електромагнітне поле хвилеводів з фрактальними властивостями перерізів: автореф. дис. на наук. ступінь к.ф.-м.н. Харків. нац. ун-т радіоелектроніки 2006.](#)
4. [Чухов В. В. Радіочастотні методи та засоби вимірювань параметрів хвилеводів із діелектричним заповненням: автореф. дис. на наук. ступінь к.т.н. Вінниц. нац. техн. ун-т. 2007.](#)