

К. т. н. Е. М. ГЛУШЕЧЕНКО

Україна, м. Київ, Науково-виробниче підприємство «Сатурн»
E-mail: gen-nto@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ПОЗДОВЖНЬО-СПІВВІСНИХ ХВИЛЕВОДНО-МІКРОСМУЖКОВИХ З'ЄДНУВАЧІВ

Проаналізовано роботу поздовжньо-співвісного хвилеводно-мікросмужкового з'єднувача, реалізованого на основі відрізка H -подібного хвилеводу, закороченого з одного боку торцевою стінкою, що дозволяє у хвильовому опорі з'єднувача коригувати реактивну компоненту як індуктивного, так і ємнісного характеру. Приділено увагу питанням розрахунку габаритів узгоджувального та коригувального елементів такого пристрою, а також вимірюванню його основних параметрів (КСХН та втрат) і математичній моделі на основі хвильової матриці розсіювання.

Ключові слова: НВЧ, мікросмужкова лінія, з'єднувач, хвилевід, коаксіал, втрати, КСХН, габарити, вимірювання, математична модель.

В наявних радіоелектронних системах діапазону надвисокої частоти (НВЧ), як телекомунікаційних, так і інших призначень, антенно-фідерні тракти (АФТ) складаються з локальних функціональних модулів, розроблених на основі різних типів ліній передачі електромагнітних хвиль, наприклад мікросмужкових ліній (МСЛ). Для об'єднання таких модулів в АФТ, який забезпечує їх конструктивне та електромагнітне узгодження, застосовують спеціалізовані пристрої — НВЧ-з'єднувачі.

НВЧ-з'єднувачі можуть бути трьох видів: однорідні хвилеводні — для об'єднання (стикування) хвилеводів з несхожими конфігураціями трактів; однорідні коаксіальні — для переходу з одного типорозміру діаметра на інший; комбіновані — пристрої, у загальному випадку реалізовані на базі відрізка прямокутного хвилеводу та коаксіального з'єднувача (хвилеводно-коаксіальні або хвилеводно-мікросмужкові).

Метою створення НВЧ-з'єднувача будь-якого типу є реалізація у максимально широкій смузі частот максимально можливого узгодження (коефіцієнта стоячої хвилі за напругою — КСХН) з мінімальними втратами при перетворенні електромагнітної хвилі (ЕМХ) основного типу H_{10} регулярного хвилеводу у хвилю трансверсально-електромагнітного (ТЕМ) типу коаксіальної лінії. Узгодження (КСХН) та втрати є основними електричними параметрами з'єднувачів.

Хвилеводно-коаксіальні з'єднувачі незалежно від типорозмірів (габаритів) можуть бути двох типів: співвісно-торцеві або поздовжньо-співвісні, й від цього залежить характер вищезначеного перетворення ЕМХ. У співвісно-торцевих з'єднувачах в результаті індуктивно-ємнісного збудження коаксіал розташовується перпендикулярно до широкої стінки хвилеводу. У поздовжньо-співвісних з'єднувачах

на основі відрізка хвилеводу коаксіал розміщується на торцевій стінці відрізка хвилеводу в її геометричному центрі, а перетворення ЕМХ відбувається в результаті її поступової та послідовної трансформації вздовж відрізка хвилеводу.

Як було зазначено вище, НВЧ-тракти радіоелектронних систем формуються з окремих автономних функціональних модулів, у яких контактнороз'єднувальні вузли реалізуються, наприклад, у вигляді хвилеводних фланців або коаксіалів різних типорозмірів. Для об'єднання таких модулів необхідні комбіновані з'єднувачі, в яких один контактний вузол — хвилеводного типу, другий — коаксіального.

Враховуючи те, що більшість сучасних НВЧ-пристроїв реалізуються в планарному (горизонтальному) виконанні, найбільш раціональною, особливо в антенних решітках, є поздовжньо-співвісна реалізація комбінованих з'єднувачів. Саме таке технічне рішення створює суттєві зручності для формування АФТ з окремих НВЧ-пристроїв.

Крім цього, оскільки сучасні антенно-фідерні тракти компонуються (формуються) з автономних НВЧ-модулів, реалізованих у герметичних корпусах з використанням інтегральних мікросмужкових ліній передачі, для таких пристроїв найперспективнішими вбачаються герметичні поздовжньо-співвісні хвилеводно-мікросмужкові з'єднувачі, бо їх можна інтегрувати у корпус модуля як контактнороз'єднувальний елемент.

У цій роботі розглянемо особливості проєктування поздовжньо-співвісного хвилеводно-мікросмужкового з'єднувача, оскільки аналіз доступних спеціалізованих видань та публікацій з НВЧ-техніки показав, що в них досить ретельно і повно розглядаються як хвилеводні [1], так і коаксіальні однорідні

з'єднувачі, включно з сучасними [2], і дуже мало інформації щодо комбінованих НВЧ-з'єднувачів.

При цьому з наявної інформації можна зробити висновок, що будь-яке технічне рішення поздовжньо-співвісного з'єднувача з новими покращеними основними параметрами має задовольняти вимогам, сформульованим у роботі [3]. Це стосується не тільки хвилеводно-коаксіальних трансформаторів, але й герметичних хвилеводно-мікросмушкових з'єднувачів. Саме тому структуру та функціональні особливості таких з'єднувачів розглянемо на прикладі цієї роботи.

Структура та функціональні особливості поздовжньо-співвісних хвилеводно-коаксіальних з'єднувачів

На рис. 1 наведено поздовжній розріз поздовжньо-співвісного хвилеводно-коаксіального (ПСХКЗ) з'єднувача. Він містить відрізок 1 прямокутного хвилеводу, закорочений торцевою стінкою 2. Через отвір у геометричному центрі торцевої стінки до хвилеводу підключений відрізок 3 коаксіальної лінії. Перетворювальна система 4 Г-подібної форми розміщується в порожнині хвилеводу і є продовженням центрального струмопровідного провідника 5 відрізка 3 коаксіальної лінії. Остання складається з аксіальної 6 і зондової 7 частин, при цьому зондова частина закріплюється в широкій стінці 8 відрізка 1 хвилеводу.

Аксіальна частина 6 перетворювальної системи 4 з боку зондової частини 7 не зафіксована в площині, що проходить через поздовжню вісь хвилеводу і паралельна його вузьким стінкам. Аксіальна частина 6 має довжину більше чверті довжини ТЕМ-хвилі в коаксіалі, а її вхідний (хвильовий) опір має реактивну складову індуктивного характеру. При цьому зондова частина 7 перетворювальної системи при її відхиленні від згаданої вище поздовжньої площини створює реактивність ємнісного характеру. Зміна положення (кута відхилення) зондової частини 7 від поздовжньо-осьової площини викликає, відповідно, зміну розташування її аксіальної частини 6, що створює можливість регулювання (компенсації) фазового зсуву, що вноситься таким з'єднувачем у хвилеводний тракт.

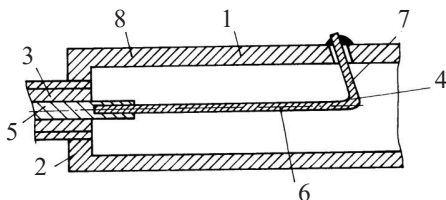


Рис. 1. Поздовжній розріз поздовжньо-співвісного хвилеводно-коаксіального з'єднувача [3]:

1 — відрізок прямокутного хвилеводу, закорочений торцевою стінкою 2; 3 — відрізок коаксіальної лінії; 4 — перетворювальна система; 5 — центральний струмопровідний провідник, що складається з аксіальної 6 і зондової 7 частин; 8 — широка стінка відрізка хвилеводу 1

Розглянутий варіант з'єднувача має досить просту конструкцію, що забезпечує їй прийнятні основні електричні параметри. Наприклад, для варіанта з прямокутним хвилеводом з розмірами у поперечному перерізі 23×5 мм у смузі частот 21% досягнуто КСХН $\leq 1,2$ при прямих втратах не більше 0,4 дБ. Однак у такому з'єднувачі для досягнення необхідних НВЧ-параметрів необхідне індивідуальне налаштування, що пов'язано зі складністю їх відтворення.

Необхідність дотримання точної довжини Г-подібної перетворювальної системи та якості її кріплення до широкої стінки хвилеводу, певних значень співвідношення між значеннями довжини її аксіальної та зондової частин, кута між ними та їх орієнтація відносно поздовжньо-осьової площини хвилеводу — всі ці вимоги до розглянутого з'єднувача дозволяють бачити в ньому лише аналог (прототип) для реалізації нових з'єднувачів комбінованого типу. Це, наприклад, запропонований у [4] пристрій, в якому перетворювальна (узгоджувальна) система виконана у вигляді ребристо-сходінкової конструкції, розташованої в поздовжньо-осьовій площині хвилеводу.

Конструкція поздовжньо-співвісного хвилеводно-мікросмушкового з'єднувача

В процесі створення нових надійних, відтворюваних і придатних до серійного виробництва поздовжньо-співвісних хвилеводно-коаксіальних або хвилеводно-мікросмушкових (ПСХМЗ) з'єднувачів із заданими НВЧ-параметрами обов'язково слід враховувати таку вимогу: конструкцію необхідно реалізовувати на основі низькоомного хвилеводу, який має не менше двох конструктивних елементів. Саме це забезпечує ті необхідні умови, які дозволяють коригувати реактивну компоненту хвильового опору з'єднувача (як індуктивного, так і ємнісного характеру) в процесі перетворення ЕМХ хвилеводною моди основного типу H_{10} регулярного хвилеводу на квазіхвилю ТЕМ-типу коаксіалу з імпедансом (хвильовим опором) $Z_0 = 50$ Ом.

Зазначеним необхідним вимогам відповідає низькоомний [5] Н-подібний хвилевід, який містить два ребра, що розміщуються вертикально один над одним в поздовжньо-осьовій площині хвилеводу, що являють собою узгоджувальний та коригувальний елементи з'єднувача і забезпечують перетворення ЕМХ типу H_{10} хвилеводу на квазіхвилю ТЕМ-типу коаксіалу. Саме в зоні вертикальної щілини між їхніми торцями знаходиться орієнтований перпендикулярно до них максимум вектора E напруженості електричного поля.

Таким чином, вибір базового елемента для створення перспективних співвісних з'єднувачів є однозначним — це Н-подібний хвилевід. Їхні особливості простіше за все можна розглянути, використавши як прототип відомий поздовжньо-співвісний хвилеводно-коаксіальний з'єднувач (трансформа-

тор) [6], у якого відрізок коаксіального кабелю замінено серійним НВЧ-компонентом — герметичною коаксіальною вставкою, імпеданс (хвильовий опір) якої ідентичний імпедансу коаксіального кабелю з $Z_0 = 50$ Ом, тобто обидві конструкції з'єднувача практично ідентичні.

Зображений на **рис. 2** герметичний ПСХМЗ [7] містить, як і співвісний з'єднувач-прототип [6], відрізок 1 прямокутного Н-подібного хвильоводу, закорочений торцевою стінкою 2. При цьому перетворення основного H_{10} -типу ЕМХ регулярного хвильоводу у ТЕМ-хвилю коаксіальної лінії з хвильовим опором (імпедансом) $Z_0 = 50$ Ом забезпечує індуктивно-ємнісна система елементів, розташованих та орієнтованих, як видно з рис. 2, б, у поздовжньо-осьовій площині хвильоводу. Ця індуктивно-ємнісна перетворювальна система містить герметичну коаксіальну вставку 3, яка замінює відрізок коаксіальної лінії з'єднувача-прототипу, а також узгоджувальну структуру 4, яка є аналогом аксіальної частини з'єднувача-аналога [3], та коригувальну структуру 5, що замінює його зондову частину.

Узгоджувальна структура 4, реалізована у формі ребристо-ступінчастої структури, розміщується на певній відстані від закорочувальної стінки 2. Нижня поверхня узгоджувальної структури 4 нерозривно з'єднана з широкою нижньою стінкою 6 хвильоводу, а у стінці верхньої сходинки узгоджувальної структури 4 співвісно з геометричним центром у закорочувальній стінці 2 виконано отвір 15 для нерозривного з'єднання з коаксіальною вставкою 3.

Узгоджувальний елемент 4 функціонально є аналогічним аксіальній частині співвісного з'єднувача-прототипу, й, відповідно, він вносить у хвильовий опір перетворювальної системи реактивну складову індуктивного характеру. При цьому він об'єднаний з герметичною коаксіальною вставкою 3 за допомогою закріпленого в отворі 15 вільного кінця 12 її центрального струмопровідного провідника 10. Отвір 15

виконано у стінці верхньої сходинки узгоджувального елемента 4 співвісно із геометричним центром закорочувальної торцевої стінки 2.

Аналогом зондової частини співвісного з'єднувача-прототипу є коригувальний елемент 5, який має вигляд паралелепіпеда, розміщеного симетрично у поздовжньо-осьовій площині відрізка 1 хвильоводу і рівновіддалено від його вузьких бічних стінок. Подібно до зондової частини співвісного з'єднувача-прототипу він також вносить реактивну складову ємнісного характеру у хвильовий опір перетворювальної системи.

Коригувальний елемент 5 розташовується перпендикулярно як до торцевої закорочувальної стінки, так і до широкої верхньої стінки 7 хвильоводу. Торець коригувального елемента 5 з боку закорочувальної стінки 2 нерозривно з'єднаний з торцевою стінкою 2, а його верхня поверхня — з широкою верхньою стінкою 7 хвильоводу. При цьому нижня поверхня коригувального елемента 5 знаходиться на певній відстані від верхньої поверхні ребристо-ступінчастої структури узгоджувального елемента 4, утворюючи при цьому (як це видно з рис. 2, б) щілину між ребрами Н-подібного хвильоводу, в якій спостерігається максимум напруженості електромагнітного поля

Герметична вставка 3 (див. рис. 2, в) має такий самий хвильовий опір, як і відрізок коаксіальної лінії з'єднувача-прототипу. Вона має металевий корпус 8, об'єднаний метало-скляним спаєм з ізолювальною втулкою 9, до якої через її геометричний центр співвісно впаяно центральний струмопровідний провідник 10 коаксіальної вставки. Його вільний кінець 11 може виконувати дві функції: забезпечувати підключення до МСЛ функціональних пристроїв АФТ або бути елементом коаксіального з'єднувача типу МЗРГ (мікроз'єднувач радіочастотний герметичний). Тому діаметр провідника 10 заздалегідь визначається або шириною регулярної МСЛ, або конструкцією МЗРГ. Водночас вільний кінець 12 провідника 10 надійно

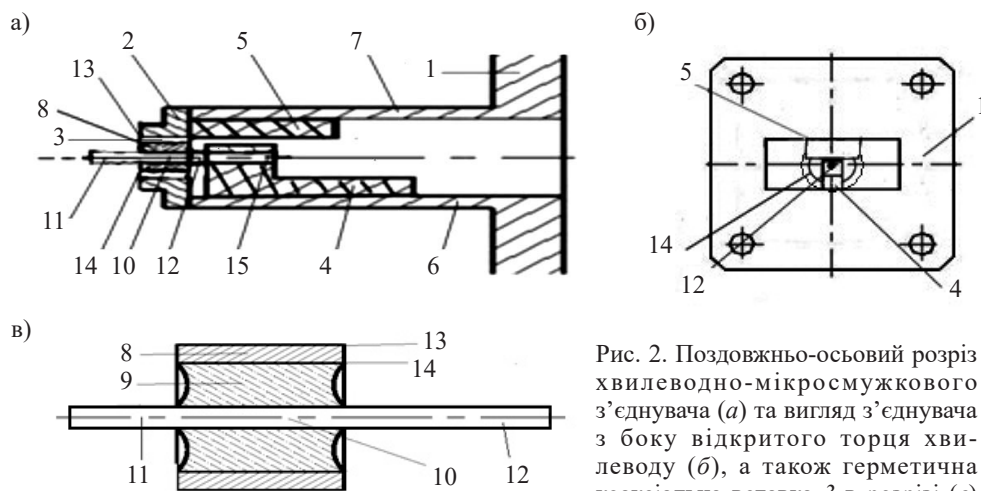


Рис. 2. Поздовжньо-осьовий розріз хвильоводно-мікросмужкового з'єднувача (а) та вигляд з'єднувача з боку відкритого торця хвильоводу (б), а також герметична коаксіальна вставка 3 в розрізі (в)

забезпечує можливість підключення коаксіальної вставки до узгоджувальної структури 4.

Довжина корпусу 8 коаксіальної вставки 3 дорівнює товщині торцевої закорочувальної стінки 2 відрізка 1 хвилеводу. При цьому зовнішня поверхня 13 корпусу 8 коаксіальної вставки нерозривно з'єднується з торцевою закорочувальною стінкою 2, а діаметр внутрішньої поверхні 14 коаксіальної вставки (при величині її імпедансу $Z_0 = 50$ Ом) дорівнює діаметру її зовнішнього провідника 14.

Товщина ребристо-ступінчастої структури узгоджувального елемента 4 має бути більше діаметра отвору 15, виконаного в ній, і тому безпосередньо визначається величиною діаметра центрального провідника 10 використовуваної коаксіальної вставки. Саме параметри ребристо-ступінчастої структури узгоджувального елемента 4 та коригувального елемента 5 перетворювальної системи визначають рівень узгодження імпедансів відрізків хвилеводу та коаксіальної лінії поздовжньо-співвісного з'єднувача.

Перетворення імпедансів від високоомного регулярного хвилеводу до низькоомної коаксіальної лінії здійснюється завдяки запропонованій оригінальній конструкції поздовжньо-співвісного з'єднувача. При цьому електромагнітна хвиля основного типу H_{10} регулярного прямокутного хвилеводу, перетворюючись на ТЕМ-хвилю коаксіальної лінії, послідовно проходить ділянки з різним хвильовим опором, а саме: регулярний прямокутний хвилевід, П-подібний хвилевід, Н-подібний хвилевід з коротким нижнім гребенем, Н-подібний хвилевід з високим нижнім гребенем і, нарешті, коаксіал із хвильовим опором $Z_0 = 50$ Ом.

Структурні елементи ПСХМЗ та їхні габарити

З рис. 2 зрозуміло, що розглянутий герметичний поздовжньо-співвісний хвилеводно-мікросмушковий з'єднувач містить цілу низку конструктивних елементів, серед яких:

- базовий відрізок прямокутного хвилеводу з габаритами $a \times b$ (a, b — відповідно, розміри широкої та вузької бічних стінок хвилеводу, закороченого з одного боку торцевою стінкою з наскрізним отвором у її геометричному центрі з координатами $(a/2; b/2)$, що збігається з поздовжньою віссю хвилеводу;

- герметична коаксіальна вставка з хвильовим опором (імпедансом) $Z_0 = 50$ Ом, співвісно і нерозривно вмонтована у наскрізний отвір в геометричному центрі торцевої закорочувальної стінки хвилеводу;

- узгоджувальний елемент з індуктивною функцією, реалізований у формі гребінчато-ступінчастої структури, розміщеної в поздовжньо-осьовій площині хвилеводу рівновіддалено від його бічних стінок, та з отвором у його верхній частині для підключення одного з вільних кінців центрального струмопровідного провідника герметичної коаксіальної вставки;

- коригувальний елемент з смісною функцією, реалізований у формі прямокутного паралелепіпеда та розміщений із зазором (щілиною) над узгоджувальною структурою в поздовжньо-осьовій площині відрізка хвилеводу рівновіддалено від його бічних стінок.

Геометричні розміри цих елементів та їх просторова орієнтація в об'ємі базового відрізка хвилеводу визначають електричні параметри з'єднувача. При цьому незалежними визначальними базовими розмірами елементів є типорозмір ($a \times b$, мм) відрізка прямокутного хвилеводу, а також типорозмір герметичної коаксіальної вставки ($D_{гв}, d_{гв}$ — відповідно, діаметри екранувальної поверхні та центрального струмопровідного провідника у мм) та її довжина $L_{гв}$ (рис. 3). Ці розміри однозначно визначають товщину закорочувальної торцевої стінки з'єднувача, відстань від якої до узгоджувального елемента не має перевищувати половину діаметра $D_{гв}$.

Що ж до габаритних розмірів узгоджувального та коригувального елементів герметичного ПСХМЗ, то їх можна надавати лише у значеннях λ_c — довжини робочої хвилі конкретного пристрою, оскільки розміри цих елементів можуть залежати від конкретної частоти.

Зображена на рис. 3 герметична коаксіальна вставка є електронним НВЧ-компонентом з хвильовим опором $Z_0 = 50$ Ом, що виготовляється серійно та має декілька конструктивних виконань, наприклад АРКА.434511.005 підприємства ПрАТ «Науково-виробниче підприємство «Сатурн».

Центральний струмопровідний провідник герметичної вставки залежно від умов її застосування може мати діаметр $d_{гв} = 0,36 — 0,80$ мм. Відповідно, для забезпечення незмінного хвильового опору $Z_0 = 50$ Ом діаметр зовнішньої екранувальної поверхні герметичної вставки складає $D_{гв} = 2,52 — 5,85$ мм. Довжина вставки залежно від умов її застосування може змінюватись у досить широких межах: $L_{гв} = 1,2 — 5,85$ мм. Найчастіше використовуваними типорозмірами герметичної коаксіальної вставки є $D_{гв}/d_{гв} = 3,5/1,52; 5,5/2,4; 7,0/3,04$.

Узгоджувальний елемент ПСХМЗ (рис. 4) має форму тонкої ступінчастої пластини, що розміщується в поздовжньо-осьовій площині з'єднувача. Оскільки узгоджувальний елемент відповідає за індуктивну функцію перетворювальної системи

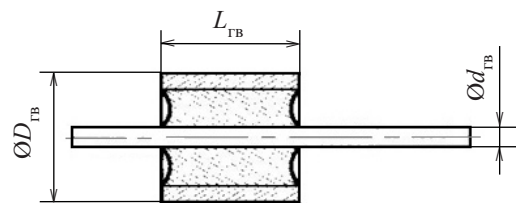


Рис. 3. Габаритне креслення герметичної коаксіальної вставки

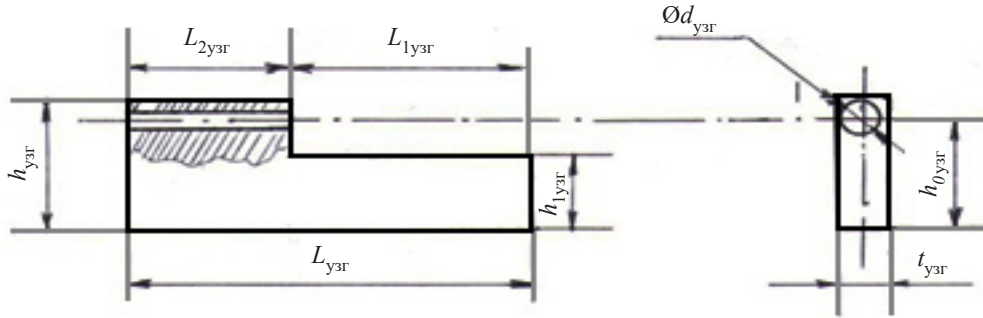


Рис. 4. Габаритне креслення узгоджувального елемента

з'єднувача, то природно реалізувати його максимально тонким. З іншого боку, товщина узгоджувального елемента $t_{узг}$ однозначно залежить від діаметра отвору в ньому $d_{узг}$, який своєю чергою залежить від діаметра герметичної вставки $d_{гв}$: $d_{узг} \geq d_{гв}$. В кінцевому результаті маємо умову $t_{узг} \geq 2d_{узг}$. Центр отвору в узгоджувальному елементі на висоті $h_{0узг}$ збігається з геометричним центром отвору у закорчувальній стінці з'єднувача та його поздовжньою віссю з координатами $(a/2; b/2)$. При цьому, відповідно, висота узгоджувального елемента ПСХМЗ визначається як $h_{узг} \geq b/2 + d_{узг}/2 = (b + d_{узг})/2$, а висота його нижньої сходинки як $h_{1узг} = h_{узг}/2 = (b + d_{узг})/4$.

Як вже зазначалося раніше, лінійні розміри узгоджувального елемента, а саме його довжину $L_{узг}$ та довжину його нижньої і верхньої сходинок $L_{1узг}$ і $L_{2узг}$ слід визначати через λ_c — довжину електромагнітної хвилі на центральній частоті робочої смуги частот з'єднувача, тобто:

$$L_{1узг} = \lambda_c/4;$$

$$L_{2узг} = \lambda_c/8;$$

$$L_{узг} = L_{1узг} + L_{2узг} = \lambda_c/4 + \lambda_c/8 = 3\lambda_c/8.$$

Коригувальний елемент ПСХМЗ має форму прямокутного паралелепіпеда з лінійною довжиною $L_{кор}$, висотою $h_{кор}$ і шириною $t_{кор}$.

Реально, з урахуванням функціонального призначення, габаритні розміри автономного коригувального елемента ПСХМЗ будуть визначатися таким чином:

$$L_{кор} = \lambda_c/4;$$

$$t_{кор} \geq D_{гв};$$

$$h_{кор} \geq b - h_{0узг} - D_{гв}/2 = b - b/2 - D_{гв}/2 = b/2 - D_{гв}/2 = (b - D_{гв})/2.$$

Якщо ж коригувальний елемент розглядати у просторовому об'ємі ПСХМЗ, наприклад відносно нижньої широкій стінки відрізка хвилеводу, то нижня поверхня коригувального елемента буде знаходитися на висоті, яка дорівнює або є більшою за величину $b/2 + D_{гв}/2 = (b + D_{гв})/2$.

Методи вимірювання основних параметрів ПСХМЗ

Поздовжньо-співвісні хвилеводно-коаксіальні або поздовжньо-співвісні хвилеводно-мікросмужкові з'єднувачі — це комбіновані НВЧ-чотириполюсники, що мають приєднувальні елементи двох типів: приєднувальний фланець фіксованого габариту (типорозміру), який залежить від робочої частоти, і частина коаксіальної конструктивної пари з хвильовим імпедансом $Z_0 = 50$ Ом. Очевидно, що для вимірювання характеристик з'єднувачів з такими конструктивними особливостями неможливо використовувати стандартну вимірювальну апаратуру, тут потрібна спеціальна метрологічна методика визначення основних електричних параметрів, втрат та КСХН (ступеня узгодження з трактом), що вносяться до АФТ з'єднувачами комбінованого типу.

У роботі [8] для вимірювання втрат і КСХН з'єднувача з хвилеводно-коаксіальним контактним вихідним елементом запропоновано об'єднати одиначні з'єднувачі в пари по хвилеводному або коаксіальному каналу (рис. 5). Цю методику можна взяти за основу для вимірювань параметрів пристроїв з хвилеводно-мікросмужковою конфігурацією, враховуючи при цьому їхні конструктивні відмінності, а саме: вихідним елементом коаксіальної контактної пари ПСХМЗ є вільний кінець центрального струмопровідного провідника герметичної коаксіальної вставки, призначений для безпосереднього приєднання до мікросмужкової лінії функціонального НВЧ-пристрою в інтегральному виконанні. Тому для вимірювання основних НВЧ-параметрів ПСХМЗ формувати пару досліджуваних (вимірюва-

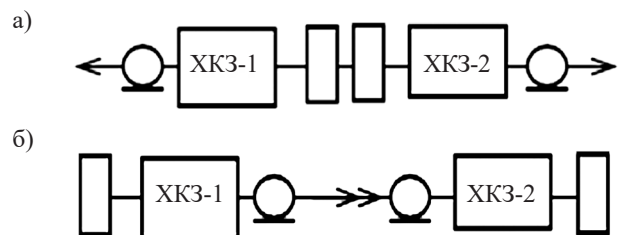


Рис. 5. Структурні схеми пар ХКЗ, об'єднаних хвилеводним (а) та коаксіальним (б) каналом

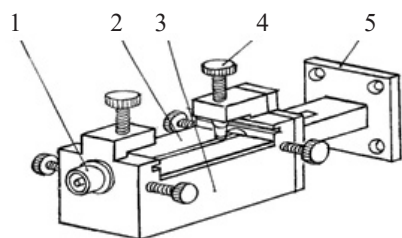


Рис. 6. Загальний вигляд спеціального оснащення для вимірювання параметрів ПСХМЗ:

1 — еталонний з'єднувач; 2 — еталонна мікросмужкова тест-плата з імпедансом $Z_0 = 50$ Ом; 3 — універсальний монтажний столик; 4 — притискні гвинти; 5 — досліджуваний ПСХМЗ

них) з'єднувачів можна лише за схемою, наведеною на рис. 5, б, але з обов'язковим використанням спеціального вимірювального оснащення (рис. 6). Слід зазначити, що як тест-плату можна застосовувати підкладку з регулярною мікросмужковою лінією з імпедансом $Z_0 = 50$ Ом або з МСЛ у вигляді меандру з таким же імпедансом для виключення можливості виникнення фазових неоднорідностей під час вимірювань.

Еталонним з'єднувачем може бути як розглянутий поздовжньо-співвісний хвилеводно-мікросмужковий з'єднувач [7] з КСХН $\leq 1,02$ (для вимірювання або дослідження нових ПСХМЗ), так і серійний мікро-коаксіальний з'єднувач [2] з аналогічним значенням КСХН (для вимірювання параметрів серії ідентичних ПСХМЗ).

Для оцінки погонних втрат α_1 ПСХМЗ слід попередньо виміряти втрати α_t МСЛ в тест-платі відняти від реально виміряних втрат G пари з'єднувачів і розділити надвос:

$$\alpha_1 = (G - \alpha_t)/2. \quad (6)$$

При цьому для одиночного ПСХМЗ методика визначення КСХН залишається без змін, тобто розрахунк виконується відповідно до [8, формули (2) — (5)].

Математична модель ПСХМЗ

Зазвичай АФТ сучасних радіоелектронних систем має математичну модель, яка формується з математичних моделей елементів тракту — як окремих функціональних модулів, так і з'єднувачів різних типів.

Якщо необхідна максимально точна теоретична математична модель з'єднувача ([S]-матриці та її коефіцієнтів), вона може бути сформована класичним електродинамічним методом. Проте це громіздкий, дуже тривалий і затратний процес, а комбіновані з'єднувачі — це допоміжні елементи НВЧ-тракту, хоча й такі, що істотно впливають на параметри АФТ. Вони мають конкретні та реально виміряні характеристики — КСХН та втрати. Тому є виправданним сформулювати [S]-матрицю такого комбінованого з'єднувача з деякими припущеннями, тобто напівемпіричним способом, як це було зроблено у роботі

[8] на підставі послідовного, ретельного та обґрунтованого розгляду. Там була сформована напівемпірична матриця розсіювання для поздовжньо-співвісного хвилеводно-коаксіального з'єднувача ПСХКЗ:

$$[S^{ХКЗ}] = \begin{vmatrix} S_{11} = |\rho_1| & S_{12} = e^{-\alpha} \\ S_{21} = e^{-\alpha} & S_{22} = |\rho_1| \end{vmatrix}. \quad (7)$$

де ρ_1 , α — відповідно, коефіцієнт відбиття та погонні втрати з'єднувача, $\alpha = \alpha_1$.

Коефіцієнти відбиття обчислюються на основі конкретно виміряних характеристик, а коефіцієнти передачі визначаються вимірним значенням втрат, внесених одиночним (автономним) герметичним з'єднувачем. Оскільки конструктивно ПСХКЗ [6] та герметичний ПСХМЗ [7] майже ідентичні, цю матрицю можна вважати прийнятною і для герметичного ПСХМЗ.

Висновок

Розглянутий варіант герметичного поздовжньо-співвісного хвилеводно-мікросмужкового з'єднувача був реалізований та експериментально апробований у широкому частотному діапазоні. Для низки типорозмірів хвилеводів було досліджено та підтверджено показники узгодження та рівня втрат у смугах частот. Наведені в таблиці параметри підтверджують ефективність запропонованого комбінованого з'єднувача.

Параметри ПСХМЗ різних типорозмірів

Переріз хвилевода, мм	Смуга частот, МГц	КСХН, не більше	Втрати, дБ, не більше
58×25	400	1,06	0,1
48×24	500	1,10	0,1
23×10	1200	1,15	0,2
23×5	600	1,15	0,2

Представлене технічне рішення є надійним, відтворюваним та серійнопридатним, і його можна рекомендувати для застосування в сучасних радіоелектронних системах. Використовуючи відомі прикладні програмні комплекси САПР, наприклад MicrowaveOffice або HFSS, можна проєктувати такі пристрої без попереднього макетування.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. *Справочник по элементам волноводной техники*. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.
2. Джуринский К.Б. *Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ*. Москва, Техносфера, 2006.
3. Тюрин Ю.В. *Соосный коаксиально-волноводный переход*. Патент РФ № 2011245, опубл. 15.04.1994.
4. Хомяков А.В. и др. *Коаксиально-волноводный переход*. Патент РФ № 2517678, опубл. 27.05.2014.
5. Шабунин С.Н., Соловьянова И.Н. *Волноводы и объемные резонаторы*, Оренбург, Уральский ГТУ, 1998, 38 с.
6. Глушеченко Е.М. *Поздовжньо-співвісний хвилеводно-коаксіальний трансформатор*. Патент України на корисну модель № 147621, 2021, бюл. № 21.
7. Глушеченко Е.М. *Герметичний поздовжньо-співвісний хвилеводно-мікросмужковий з'єднувач*. Патент України на корисну модель №151222, 2022, бюл. №25.

8. Глушеченко Е.М. Методи вимірювання та математична модель основних характеристик хвильоводно-коаксialних з'єднувачів. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2021, № 5–6, с. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.16>.

9. Тишер Ф. *Техника измерений на сверхвысоких частотах: Справочное руководство*. Москва, Физматгиз, 1963, 368 с.

10. Можаровский А.В., Соикин О.В., Артеменко А.А. и др. Широкополосный волноводно-микрополосковый переход зон-

дового типа миллиметрового диапазона длин волн. *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2019, т. 22, № 5, с. 17–32.

11. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. *Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ*. Москва, Связь, 1971, 388 с.

Дата надходження рукопису до редакції 15.06 2022 р.

DOI: 10.15222/TKEA2022.4-6.10
UDC 621.372.22

E. M. GLUSHECHENKO

Ukraine, Kyiv, “Saturn” Research and Production Enterprise

E-mail: gen-nto@ukr.net

PARTICULAR ASPECTS OF DESIGNING LONGITUDINAL-COAXIAL WAVEGUIDE-MICROSTRIP CONNECTORS

The authors justify the use of combined longitudinal-coaxial connectors — waveguide-coaxial or waveguide-microstrip type — in new modern antenna-feeder microwave paths.

Using the example of a basic coaxial waveguide-coaxial connector based on a section of a regular rectangular waveguide, the study considers the process of converting an electromagnetic wave of a regular waveguide of the main waveguide type H_{10} into a transverse electromagnetic wave of a coaxial line with a wave resistance (impedance) $Z_0 = 50 \text{ Ohm}$. Such a connector allows implementing good electrical parameters — matching (standing wave ratio, SWR) and linear losses — but its design is difficult to configure and cannot be reliably reproduced. However, the basic operation principles of this connector make it possible to use it as a prototype when creating modern coaxial waveguide-coaxial or waveguide-microstrip connectors.

One example of such a modern connector is the sealed longitudinal-coaxial waveguide-microstrip connector based on a segment of H-shaped waveguide, shorted by an end wall on one end. Correcting the reactive component of both inductive and capacitive nature will allow achieving the required parameters of the wave impedance of the connector. With this in mind, the author has built an inductive-capacitive system consisting of a matching element in the form of a staggered fin and a corrective element in the form of a rectangular parallelepiped. To ensure the air tightness of the connector design, the segment of the coaxial line was replaced by a sealed coaxial insert, which is a serial electronic component.

Particular attention was paid to the layout and design of this sealed waveguide-microstrip connector, as well as to the calculation of the overall dimensions of its elements.

The article proposes an original technique for measuring the main parameters of both waveguide-coaxial and waveguide-microstrip connectors. The author forms a mathematical model of combined type connectors based on the scattering wave matrix and presents the parameters of real hermetically sealed longitudinally coaxial waveguide-microstrip connectors based on waveguide segments of various standard sizes and measured at various frequencies.

Keywords: microwave, microstrip line, connector, waveguide, coaxial, loss, SWR, dimensions, measurement, mathematical model.

REFERENCES

1. Fel'dshteyn A.L., Yavich L.R., Smirnov V.P. *Spravochnik po elementam volnovodnoy tekhniki* [Handbook on the elements of waveguide technology]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1963, 670 p. (Rus)

2. Dzhurinskiy K.B. *Miniaturnyye koaksial'nyye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCH* [Miniature Coaxial Radio Components for Microwave Microelectronics]. Moscow, Tekhnosfera, 2006, 216 p. (Rus)

3. Tyurin Yu. V. [Coaxial coaxial-waveguide transition]. *Patent of RF 2011245*, 1994. (Rus)

4. Khomyakov A. V. etc. *Koaksial'no-volnovodnyy perekhod* [Coaxial-waveguide transition]. *Patent of RF 2517678*, 2014. (Rus)

5. Shabunin S.N., Solovyanova I.N. *Volnovody i ob'yemnyye rezonatory* [Waveguides and cavity resonators]. Orenburg, Ural State Technical University, 1998, 38 p. (Rus)

6. Glushechenko E. M. [Longitudinal-coaxial waveguide-coaxial transformer]. *Patent of Ukraine 147621*, bull. no. 21, 2021. (Ukr)

7. Glushechenko E. M. [Hermetic longitudinal-coaxial waveguide-microstrip coupler]. *Patent of Ukraine 151222*, bull. no. 25, 2022. (Ukr)

8. Glushechenko E. M. Measurement methods and mathematical model of main characteristics of waveguide-coaxial connectors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.16> (Ukr)

9. Tisher F. *Tekhnika izmereniy na sverkhvysokikh chastotakh: Spravochnoye rukovodstvo* [Measurement technique at microwave frequencies: a handbook]. Moscow, Fizmatgiz, 1963, 368 p. (Rus)

10. Mozharovskiy A.V., Soykin O.V., Artemenko A.A. et al. Wideband waveguide-to-microstrip transition for mm-wave applications. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2019, vol. 22, no. 5, pp. 17–32. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-5-17-32> (Rus)

11. Fel'dshteyn A.L., Yavich L.R. *Sintez chetyrekhpolysnikov i vos'mipolysnikov na SVCH* [Synthesis of Four-Terminal and Eight-Terminal Networks at Microwave Frequencies]. Moscow, Svyaz', 1971, 388 с. (Rus)

Опис статті для цитування:

Глушеченко Е. М. Особливості проектування поздовжньо-співвісних хвильоводно-мікросмужкових з'єднувачів. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2022, № 4–6, с. 10–16. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.10>

Cite the article as:

Glushechenko E. M. Particular aspects of designing longitudinal-coaxial waveguide-microstrip connectors. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2022, no. 4–6, pp. 10–16. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.4-6.10>