

К. т. н. Е. М. ГЛУШЕЧЕНКО

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

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХВИЛЕВОДНО-КОАКСІАЛЬНИХ З'ЄДНУВАЧІВ

Обґрунтовано доцільність використання хвилеводно-коаксіальних з'єднувачів, зазначено їхні основні конструктивні особливості та електричні характеристики, що впливають на аналіз та моделювання антенно-фідерних трактів. Запропоновано метод вимірювання втрат та рівня узгодження таких пристроїв з НВЧ-трактом, а також математичну модель, що їх описує.

Ключові слова: НВЧ, з'єднувач, хвилевід, коаксіал, узгодження, КСХН, втрати, моделювання.

У сучасних складних радіоелектронних системах НВЧ-діапазону — зв'язкових, телекомунікаційних, радіолокаційних — для досягнення поставлених цілей автономними інтегральними елементами антенно-фідерних трактів (АФТ) можуть виступати (особливо в короткохвильовій частині сантиметрового та міліметрового діапазонів) функціональні пристрої, реалізовані на лініях передачі різного типу [1]. З метою об'єднання таких пристроїв один з одним для формування АФТ можуть використовуватися спеціальні з'єднувачі одного з трьох типів: коаксіальні — для з'єднання пристрою одного типорозміру діаметра з іншим, хвилеводні — для з'єднання (стикування) хвилеводів з незбіжними конфігураціями трактів, а також комбіновані НВЧ-пристрої, реалізовані на основі відрізка хвилеводу та коаксіалу.

Основними електричними характеристиками хвилеводно-коаксіальних з'єднувачів (ХКЗ) є втрати, що вносяться пристроєм до АФТ, і узгодження з регулярним НВЧ-трактом (коефіцієнт стоячої хвилі за напруженістю — КСХН або K_{CX}). Інформація щодо них разом з математичною моделлю (хвильові матриці — розсіювання в [S]-параметрах або передачі в [T]-параметрах) дозволяє не тільки виконати аналіз вже існуючих і реалізованих АФТ, а й моделювати НВЧ-тракти радіоелектронних систем, визначитися з компонованням і остаточними електричними параметрами їхніх АФТ.

Вимірювання характеристик з'єднувачів з одностипним каналом (коаксіальних або хвилеводних) реалізується за стандартними методиками за допомогою стандартної апаратури, що має регулярний вимірювальний канал, наприклад за допомогою панорамного вимірювача параметрів НВЧ-кіл. Для дослідження хвилеводних структур застосовуються класичні методики [2], а для досліджень різних модифікацій мініатюрних коаксіальних з'єднувачів найчастіше використовують методики, викладені в [3].

ХКЗ будь-якого типу — це комбіновані НВЧ-чотириполюсники з приєднувальними елементами, що бувають двох типів: приєднувальний фланець фіксованих (залежно від робочої частоти) габаритів (типорозміру) або частина коаксіальної контактної пари з хвильовим опором $Z_0 = 50$ Ом. Відповідно, застосувати стандартну вимірювальну апаратуру для вимірювання характеристик ХКЗ з такими конструктивними особливостями неможливо — для цього необхідна спеціальна метрологічна методика.

Слід зазначити, що в публікаціях, присвячених розробці нових рішень ХКЗ [4, 5], розглядаються тільки особливості їхньої конструкції та характеристики пристроїв без посилань на конкретні методики, які використовувалися авторами для вимірювань. У цій статті запропоновано варіант методики, призначеної для вимірювання характеристик хвилеводно-коаксіальних з'єднувачів.

Конструктивні особливості ХКЗ

У загальному випадку хвилеводно-коаксіальні з'єднувачі являють собою комбінований НВЧ-пристрій, реалізований на основі відрізка регулярного хвилеводу та коаксіального роз'єму. Незалежно від габаритів використовуваних коаксіальних з'єднувачів ХКЗ можуть бути двох типів: співвісно-торцеві або поздовжньо-співвісні (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд ХКЗ: співвісно-торцевого (зліва) і поздовжньо-співвісного (справа)

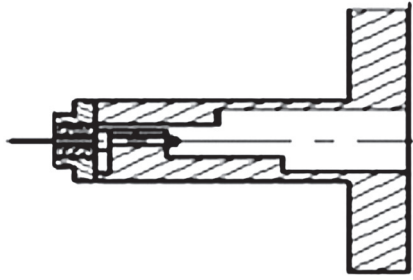


Рис. 2. Поздовжній розріз поздовжньо-співвісного хвильоводно-коаксіального переходу [6]

У кожному з цих ХКЗ здійснюється перетворення електромагнітної хвилі основного типу H_{10} регулярного прямокутного хвильоводу у квазіволну трансверсально-електромагнітного типу (ТЕМ): в співвісно-торцевих ХКЗ в результаті індуктивно-емнісного збудження коаксіал орієнтований перпендикулярно до широкої стінки хвильоводу, а в поздовжньо-співвісних ХКЗ коаксіал розташовується на торцевій стінці відрізка хвильоводу в її геометричному центрі в результаті поступової і послідовної трансформації електромагнітної хвилі вздовж відрізка хвильоводу. Прикладом варіанта поздовжньо-співвісного ХКЗ може служити, наприклад, пристрій, поздовжній розріз якого наведено на рис. 2.

Методики вимірювання основних характеристик ХКЗ

Логічно припустити, що при вимірюванні втрати КСХН тип розглянутих ХКЗ не є принциповим, тому заради зручності зображення структурних схем методику їх вимірювання будемо розглядати на прикладі поздовжньо-співвісних ХКЗ [2].

З [7] відомо, що найбільш достовірним і точним, хоча й достатньо трудомістким, способом вимірювання НВЧ-втрат є метод заміщення, коли вимірюваний НВЧ-пристрій включається в розрив регулярного вимірювального тракту. Оскільки ХКЗ — це пристрій з різномірними контактними каналами, то вносимі пристроями до НВЧ-тракту втрати доцільно вимірювати не для окремих пристроїв, а для пар ХКЗ, об'єднаних хвильоводним або коаксіальним каналом (рис. 3).

Слід зазначити, що тип об'єднаних в парі ХКЗ вибирається залежно від структури калібрувально-вимірювального каналу застосовуваної апаратури.

Як впливає з [6], за умови хорошого узгодження, у ХКЗ в результаті перетворення типу електромагнітних хвиль в лініях передачі на ділянці з прямокутним хвильоводом і на ділянці коаксіалу з ТЕМ-хвилею амплітуди коефіцієнтів відбиття ідентичні. Тому для визначення рівня втрат α , що вносяться до тракту окремим ХКЗ, представляється допустимим реально виміряти втрати G пари пристроїв розділити надвоє:

$$\alpha \text{ [дБ]} = 0,5G \text{ [дБ]} \quad (1)$$

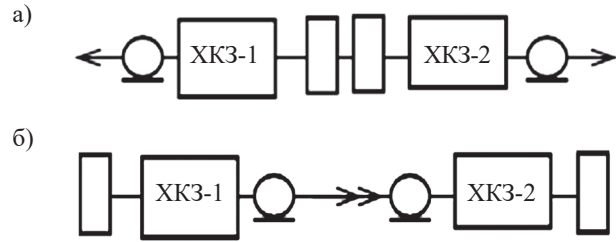


Рис. 3. Структурні схеми пар ХКЗ, об'єднаних хвильоводним (а) та коаксіальним (б) каналом

Складніше оцінити рівень узгодження окремого ХКЗ. Існує два практично застосовуваних методи, які виключають неоднозначність вимірювань НВЧ-параметрів узгодження ХКЗ.

Перший передбачає проведення вимірювань параметрів узгодження одиничного ХКЗ з використанням узгодженого навантаження першого класу ($K_{CX} \leq 1,02$). При цьому, якщо вимірюваний ХКЗ підключається до хвильоводного рефлектометра вимірювальної апаратури за допомогою стандартних фланців, застосовують коаксіальне узгоджене навантаження. Відповідно, якщо ХКЗ підключається до коаксіального рефлектометра, застосовують хвильоводне узгоджене навантаження.

Другий метод передбачає проведення вимірювань НВЧ-параметрів пари ХКЗ, безпосередньо з'єднаних фланцями назустріч один одному (рис. 3, а), з використанням коаксіального узгодженого навантаження. Цей метод аналогічний класичному методу вимірювання параметрів НВЧ-пристроїв — методу заміщення [7]. У випадку з ХКЗ він реалізується в три етапи:

- калібрування вимірювального тракту з підключенням узгодженого навантаження;
- вимірювання НВЧ-параметрів пари з'єднаних фланцями ХКЗ;
- перерахунок вимірюваних параметрів для окремого ХКЗ.

Для експериментально вимірюваного рівня узгодження пари об'єднаних ХКЗ справедливим є вираз [8]

$$K_{CX}^{\Sigma} = \frac{1 + |\rho^{\Sigma}|}{1 - |\rho^{\Sigma}|}, \quad (2)$$

звідки можна знайти модуль коефіцієнта відбиття системи

$$|\rho^{\Sigma}| = \frac{K_{CX}^{\Sigma} - 1}{K_{CX}^{\Sigma} + 1}. \quad (3)$$

Якщо прийняти, що модуль коефіцієнта відбиття окремого ХКЗ дорівнює половині $|\rho^{\Sigma}|$, тобто

$$|\rho^1| = 0,5|\rho^{\Sigma}| = 0,5 \cdot \frac{K_{CX}^{\Sigma} - 1}{K_{CX}^{\Sigma} + 1}, \quad (4)$$

то після низки математичних перетворень рівень узгодження окремого ХКЗ з НВЧ-трактом поздовжньо-

співвісного хвилеводно-коаксіального роз'єму можна визначити таким чином:

$$|K_{CX}^1| = \frac{3K_{CX}^\Sigma + 1}{K_{CX}^\Sigma + 3}. \quad (5)$$

Математична модель ХКЗ

У складних колах з розподіленими постійними, таких як АФТ, змінними величинами, що не залежать від типу ліній передачі, прийнято використовувати падаючі та відбиті потужності, а залежність між падаючими та відбитими від ХКЗ-чотириполосника хвилями визначається хвильовою матрицею розсіювання та її окремими коефіцієнтами:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Діагональні елементи матриці S_{11} та S_{22} — це коефіцієнти відбиття від відповідного плеча, а S_{12} та S_{21} — коефіцієнти передачі, еквівалентні внесеним чотириполосником втрат. Тому в НВЧ-техніці безпосередніми об'єктами вимірювань є коефіцієнти відбиття та передачі пристроїв, при цьому виміри проводяться з узгодженням навантаженням.

ХКЗ будь-якого типу, включно з поздовжньо-співвісними, є взаємними НВЧ-чотириполосниками трансформаторної схеми з нерівномірностями у вигляді змінюваних хвильових опорів (електромагнітної хвилі від хвилеводної моди основного типу H_{10} до ТЕМ-хвилі з хвильовим опором $Z_0 = 50$ Ом).

У загальному випадку строго теоретично математична модель ХКЗ (у вигляді коефіцієнтів $[S]$ -матриці) може бути сформована класичним електродинамічним методом, але це громіздкий, дуже тривалий і коштовний процес. У той же час ХКЗ — це допоміжні елементи НВЧ-тракту, хоча й такі, що істотно впливають на параметри АФТ. Вони мають конкретні й реально вимірювані характеристики — КСХН і втрати. Тому з деяким припущенням можна сформулювати $[S]$ -матрицю такого хвилеводно-коаксіального роз'єму напівемпіричним методом. Тоді матриця розсіювання реалізованого ХКЗ з вимірюваними характеристиками набуває такого вигляду:

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

Тут коефіцієнти відбиття сформовані на основі вимірювань і подальших розрахунків відповідно до

виразу (4), а коефіцієнти передачі визначаються вимірним значенням втрат, що вносяться реальним окремим ХКЗ.

Висновки

Наведена методика вимірювання основних електричних характеристик хвилеводно-коаксіальних з'єднувачів, а саме втрат, що вносяться пристроєм до антенно-фідерних трактів, і узгодження з регулярним НВЧ-трактом (коефіцієнт стоячої хвилі за напруженістю), пройшла експериментальну апробацію на низці конкретних пристроїв. При цьому з'єднувачі досліджувалися не тільки в різних частотних діапазонах (хвилеводах типорозмірами від 23×5 до 58×25 мм), але й з різними конструктивними рішеннями коаксіального каналу (типорозмірами $3,5/1,52$; $6,0/2,6$ та $7,0/3,04$ мм).

Багаторазово відтворені результати вимірювань характеристик ХКЗ за запропонованою методикою підтвердили їхню достовірність, що дозволяє рекомендувати її для застосування авторам ініціативних проєктів при створенні сучасних радіотехнічних комплексів — це надасть можливість скоротити терміни розробки та суттєво заощадити кошти.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. *Проектирование и расчет СВЧ-элементов на полосковых линиях*. Москва, Сов. радио, 1972, 276 с.
2. Валитов Р.А., Сретенский В.Н. *Радиотехнические измерения*. Москва, Сов.радио, 1970.
3. Джурицкий К.Б. *Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ*. Москва, Техносфера, 2006, 216 с.
4. Можаровский А.В., Артеменко А.А., Масленников Р.О., Вендик И.Б. Широкополосный волноводно-микрополосковый переход для частотного диапазона 60 ГГц. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2019; т. 22, № 4, с. 31–44. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-4-31-44>
5. Можаровский А.В., Сойкин О.В., Артеменко А.А. и др. Широкополосный волноводно-микрополосковый переход зондового типа миллиметрового диапазона длин волн. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2019, т. 22, № 5, с. 17–32. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-5-17-32>
6. Глушеченко Е.М. Поздовжньо-співвісний хвилеводно-коаксіальний трансформатор: патент України № 147621. Бюл. № 21, 2021.
7. Тишер Ф. *Техника измерений на сверхвысоких частотах : Справочное руководство*. Москва, Физматгиз, 1963, 368 с.
8. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. *Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ*. Москва, Связь, 1971, 388 с.

Дата надходження рукопису до редакції 10.02 2021 р.

MEASUREMENT METHODS AND MATHEMATICAL MODEL OF MAIN CHARACTERISTICS OF WAVEGUIDE-COAXIAL CONNECTORS

Modern complex microwave radio electronic systems may use functional devices implemented on different types of transmission lines. In order to connect such devices to each other to form antenna feed system, the following three types of special connectors can be used: coaxial, waveguide, and combined microwave devices based on waveguide and coaxial segments.

The main electrical characteristics of waveguide coaxial connectors (WCC) are the losses introduced by the device to the antenna feed and matching with the regular microwave path (voltage standing-wave ratio, VSWR). Standard methods and standard equipment used to measure the characteristics of coaxial or waveguide connectors cannot be applied to WCCs.

This article proposes a method designed to measure the main characteristics of waveguide-coaxial connectors and presents their mathematical model (wave matrices). The proposed methods of measuring microwave characteristic are demonstrated on the example of waveguide coaxial connectors of longitudinal coaxial type.

It should be noted that the proposed technique has been experimentally tested on a number of specific devices. Not only the waveguide coaxial connectors have been studied in different frequency ranges (waveguide sizes from 23×5 to 58×25 mm), but also with different coaxial channel designs (sizes 3.5/1.52; 6.0/2.6 and 7.0/3.04 mm).

The proposed method provides replicable measurements results of the characteristics of waveguide coaxial connectors, which confirms its reliability.

Keywords: *microwave, connector, waveguide, coaxial, matching, VSWR, loss, modeling.*

REFERENCES

1. Maloratskiy L.G., Yavich L.R. *Proyektirovaniye i raschet SVCH-elementov na poloskovykh liniyakh* [Design and Calculation of Microwave Elements on Strip Lines]. Moscow, Sov. Radio, 1972, 276 p.
2. Valitov R.A., Sretenskiy V.N. *Radiotekhnicheskiye izmereniya* [Radio Engineering Measurements]. Moscow, Sov. Radio, 1970.
3. Dzhurinskiy K.B. *Miniatyurnyye koaksial'nyye radiokomponenty dlya mikroelektroniki SVCH* [Miniature Coaxial Radio Components for Microwave Microelectronics]. Moscow, Tekhnosfera, 2006, 216 p.
4. Mozharovskiy A.V., Artemenko A.A., Maslennikov R.O., Vendik I.B. Design of wideband waveguide-to-microstrip transition for 60 GHz frequency band. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2019;22(4):31-44. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-4-31-44>
5. 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;22(5):17-32. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-5-17-32>
6. Glushechenko E. M. [Longitudinal-Coaxial Waveguide-Coaxial Transformer]. *Patent of Ukraine 147621*, bull. no. 21, 2021.
7. Tisher F. *Tekhnika izmereniy na sverkhvysokikh chastotakh* : *Spravochnoye rukovodstvo* [Technique of Measurements at Microwave Frequencies: A Reference Guide]. Moscow, Fizmatgiz, 1963, 368 p.
8. 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 c.

Опис статті для цитування:

Глушеченко Е. М. Методи вимірювання та математична модель основних характеристик хвильоводно-коаксимальних з'єднувачів. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 5–6, с. 16–19. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.16>

Cite the article as:

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>