

УДК 621.3.029.6

Л.Я. Ільницький, д-р. техн. наук
 В.О. Іванов, д-р. техн. наук
 В.Т. Богатир, канд. техн. наук

ДВОЗОНДОВИЙ ВИМІРЮВАЧ КОМПЛЕКСНОГО КОЕФІЦІЄНТА ВІДБИТТЯ

Інститут електроніки та систем управління НАУ, e-mail: lvb@nau.edu.ua

Розглянуто двозондовий пристрій, призначений для автоматизованого вимірювання коефіцієнта відбиття в діапазоні надвисоких частот. У системі керування роботою вимірювача основними вузлами є сумарно-різницевий міст і мікропроцесор.

Постановка завдання

Комплексний коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі є одним із найважливіших параметрів, які характеризують режим роботи лінії передачі у діапазоні надвисоких частот і визначають повний комплексний опір навантаження або вхідний опір антени.

Необхідність вимірювання комплексного коефіцієнта відбиття виникає при розробці антенних пристроїв, їх фізичному моделюванні, оцінці навантаження на генератор або підсилювач вихідних сигналів, контролі параметрів фідерних трактів, оцінці впливу пристроїв надвисоких частот на режим роботи фідера та ін.

Стан проблеми

Існуючі три-, чотирizonдові вимірювачі коефіцієнтів відбиття мають певні недоліки [1 – 3].

Основними з них є вузькосмуговість вимірювального пристрою і внесення суттєвих неоднорідностей у лінію передачі кожним окремим електричним зондом.

Наприклад, у зондових вимірювачах комплексного коефіцієнта відбиття у високочастотний тракт вводять три або чотири зонди, які розміщуються на певних відстанях між собою, що визначаються довжиною хвилі в лінії.

Отже, такий вимірювач працює на одній довжині хвилі.

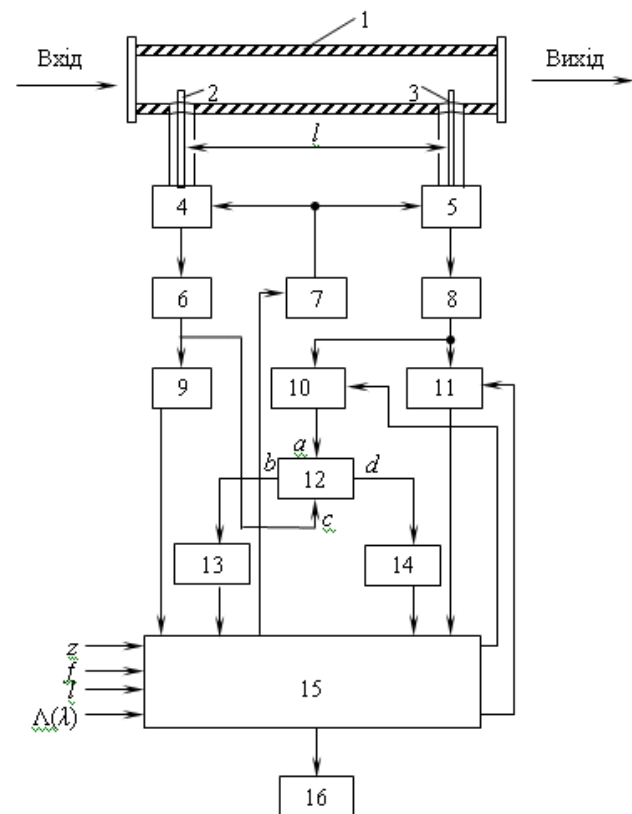
Чотири зонди створюють чотири непередбачених відбитих хвилі, що поширюються до первинного джерела їх збудження. Ці хвилі вносять певні похибки в результати вимірювання коефіцієнта відбиття. Тому виникає необхідність у створенні більш досконалих вимірювачів з використанням сучасних технологій і елементної бази.

Мета досліджень

Для розширення смуги робочих частот і зменшення кількості відбитих хвиль у лінії передачі, поява яких обумовлена веденням вимірювального приладу, необхідно розробити двозондовий вимірювач коефіцієнта відбиття.

Суть досліджень

Структурна схема вимірювача містить секцію l лінії передачі, яка може включатися в розрив високочастотного тракту, що досліджується (див. рисунок).



Структурна схема вимірювача:

1 – лінія передачі; 2, 3 – електричні зонди; 4, 5 – перетворювачі частоти; 6, 8 – підсилювачі; 7 – гетеродина; 9, 11 – детектори; 10 – фазообертач; 12 – сумарно-різницевий міст; 13, 14 – детектори; 15 – процесор; 16 – індикатор

У секції l лінії передачі є отвори, через які в порожнину секції введені два електричні зонди 2 і 3.

Частота напруги із зондів 2 і 3 за допомогою перетворювачів частоти і гетеродина 7, який автоматично підстроюється, зменшується до певного фіксованого значення, щоб процеси обробки сигналів проходили на одній частоті.

Сигнали з перетворювачів підсилюються в блоках 6 і 8.

Коефіцієнт підсилення блока 8 змінюється так, щоб амплітуди напруг в обох каналах вирівнялися, що визначається за вихідними напругами детекторів 9 і 11.

Вихідна напруга підсилювача 8 зсувається за фазою у фазообертачі 10 так, щоб різниця високочастотних сигналів, яка визначається на виході b сумарно-різницевого моста 12 дорівнювала нулю.

На входи a і c моста 12 прикладені високочастотні напруги першого і другого каналів.

З виходу a знімається подвоєна (сумарна) напруга, яка використовується для додаткового контролю фазового зсуву.

Різницева напруга з виходу b і сумарна з виходу d детектуються пристроями 13 і 14 та надходять у процесор 15, який визначає необхідний фазовий зсув.

При досягненні рівності амплітуд і рівності фаз процесор 15 за заданою програмою обчислює модуль Γ і фазу φ_0 коефіцієнта відбиття, а також може визначити опір навантаження на фідерний тракт.

Для керування підсилювачем 8 і фазообертачем 10 процесор 15 виробляє керуючі сигнали, які за допомогою ліній зв'язку подаються на відповідні пристрої.

У процесор 15 вводиться необхідна для розрахунку інформація, що є сталою для вибраної схеми вмикання вимірювача в той чи інший фідерний тракт. Це відстань z від навантаження до зонда 2, частота коливань у фідері, відстань l між зондами та залежність довжини хвилі в секції l від довжини хвилі коливань у вільному просторі

$$\Lambda = f(\lambda).$$

Відстань l між зондами може бути відносно довільною, що не вносить суттєвих обмежень на ширину смуги робочих частот. Але для компенсації хвиль, які відбиваються від зондів, доцільно забезпечити відстань між зондами, що дорівнює чверті середньої довжини хвилі Λ_0 у хвилеводі робочого діапазону, тобто

$$l = \frac{\Lambda_0}{4}.$$

Результати вимірювань відображаються на індикаторі 16.

Принцип вимірювання комплексного коефіцієнта відбиття

$$\tilde{\Gamma} = \Gamma \exp(i\varphi_0)$$

електромагнітної хвилі від навантаження ґрунтується на залежності амплітуди комплексної напруги \dot{U} в лінії передачі від повного ком-

плексного опору навантаження і відстані z від навантаження до розглядуваного перерізу лінії.

В електричному зонді 2, активна довжина якого дорівнює h , під впливом напруженості електричного поля падаючої хвилі \dot{E}_Π виникає напруга, комплексна амплітуда якої

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_\Pi e^{i\beta z} (1 + \tilde{\Gamma} e^{-i2\beta z}), \quad (1)$$

де \dot{U}_Π – комплексна амплітуда напруги, яка індукується в зонді під впливом падаючої електромагнітної хвилі:

$$\dot{U}_\Pi = \dot{E}_\Pi h$$

β – коефіцієнт фази хвилі:

$$\beta = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

Λ – довжина хвилі в секції l лінії передачі, наприклад, у прямокутному радіохвилеводі.

У зонді 3 збуджується напруга з комплексною амплітудою:

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_\Pi e^{i\beta(z-l)} [1 + \tilde{\Gamma} e^{-i2\beta(z-l)}]. \quad (2)$$

Вираз (2), виокремлюючи в ньому напругу \dot{U}_2 (1), можемо подати у вигляді:

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_2 e^{-i\beta l} \frac{1 + \tilde{\Gamma} e^{-i2\beta(z-l)}}{1 - \tilde{\Gamma} e^{-i2\beta z}}. \quad (3)$$

Введемо позначення

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 - 2\beta z &= \delta; \\ \varphi_0 - 2\beta(z-l) &= \delta + \chi, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де $\chi = \beta l$.

З урахуванням виразів (4) перетворимо запис коефіцієнта відбиття, який наданий формулою (3), з експоненціальної форми в алгебричну:

$$\tilde{\Gamma} e^{-i2\beta z} = \Gamma e^{i(\varphi_0 - 2\beta z)} = \Gamma \cos \delta + i\Gamma \sin \delta = v + iw. \quad (5)$$

Дійсну v та уявну w величини функції (5) необхідно знайти тому, що вони визначають модуль

$$\Gamma = \sqrt{v^2 + w^2}$$

й аргумент

$$\varphi_0 = \arctg \frac{w}{v} + 2\beta z$$

комплексного коефіцієнта відбиття $\tilde{\Gamma}$.

Вираз добутку в чисельнику формули (3) набуває вигляду

$$\begin{aligned} \tilde{\Gamma} e^{-i2\beta(z-l)} &= \Gamma \cos(\delta + \chi) + i\Gamma \sin(\delta + \chi) = \\ &= v \cos \chi - w \sin \chi + i(w \cos \chi + v \sin \chi). \end{aligned} \quad (6)$$

Запишемо умову рівності амплітуд після підсилення:

$$|\dot{U}_2| = \alpha |\dot{U}_3|, \quad (7)$$

де α – відношення коефіцієнтів підсилення пристроїв 8 та 6 відповідно (див. рисунок):

$$\alpha = \frac{K_3}{K_2}$$

Підставляючи вирази (3) і (6) у формулу (7), отримуємо співвідношення, на основі яких можна визначити складові комплексного коефіцієнта відбиття:

$$\alpha \left| \frac{1 + v \cos \chi - w \sin \chi + i(v \sin \chi + w \cos \chi)}{1 + v + iw} \right| = 1. \quad (8)$$

Різницю фаз напруг \dot{U}_2 і \dot{U}_3 записуємо так:

$$\begin{aligned} \arg \dot{U}_3 &= \arg \dot{U}_2 + \Phi - \beta l + \\ &+ \arg \left[\frac{1 + v \cos \chi - w \sin \chi + i(v \sin \chi + w \cos \chi)}{1 + v + iw} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

де Φ – фазовий зсуву, що вноситься фазообертачем 10.

У виразі (9) позначимо різницю фаз:

$$\beta l - \Phi = \Phi_0.$$

Тоді рівняння (9) за умови однакових фаз напруг \dot{U}_2 і \dot{U}_3 набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= \arg \left[\frac{1 + v \cos \chi - w \sin \chi}{1 + v + iw} + \right. \\ &\left. + \frac{i(v \sin \chi + w \cos \chi)}{1 + v + iw} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Розв'язок системи рівнянь (8) і (10) дозволить визначити значення дійсної частини v коефіцієнта відбиття $\tilde{\Gamma}$ і його уявної частини w .

Для створення алгоритму розв'язання означеної системи рівнянь надаємо виразу (8) таку форму:

$$\begin{aligned} 1 + 2v + v^2 + w^2 &= \\ &= \alpha^2 + 2\alpha^2 v \cos \chi - 2\alpha^2 w \sin \chi + \alpha^2 (v^2 + w^2) \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} (\alpha^2 - 1)(v^2 + w^2) + 2(\alpha^2 \cos \chi - 1)v - \\ - 2\alpha^2 w \sin \chi + \alpha^2 - 1 = 0. \end{aligned}$$

Вираз (10) перетворюємо до такого вигляду:

$$\Phi_0 = \arctg \frac{v \sin \chi + w \cos \chi}{1 + v \cos \chi - w \sin \chi} - \arctg \frac{w}{1 + v}.$$

Позначимо

$$\operatorname{tg} \Phi_0 = \operatorname{tg}(\beta l - \Phi) = b.$$

У цьому випадку тангенс повної фази комплексного коефіцієнта відбиття $\tilde{\Gamma}$ набуває вигляду:

$$\begin{aligned} b &= \frac{\frac{v \sin \chi + w \cos \chi}{1 + v \cos \chi - w \sin \chi + w \cos \chi}}{1 + \frac{w(v \sin \chi + w \cos \chi)}{(1 + v)(1 + v \cos \chi - w \sin \chi)}} = \\ &= \frac{v \sin \chi + w \cos \chi + (v^2 + w^2) \sin \chi - w}{1 + (1 + \cos \chi)v - w \sin \chi + (v^2 + w^2) \cos \chi}. \end{aligned} \quad (11)$$

Вираз (11), після деяких перетворень подамо у формі:

$$\begin{aligned} (b \cos \chi - \sin \chi)(v^2 + w^2) + [b(1 + \cos \chi) - \sin \chi]v + \\ + (1 - b \sin \chi - \cos \chi)w + b = 0. \end{aligned}$$

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} \frac{2(\alpha^2 \cos \chi - 1)}{\alpha^2 - 1} &= a_{11}; \\ -\frac{2\alpha^2 \sin \chi}{\alpha^2 - 1} &= a_{12}; \\ \frac{b(1 + \cos \chi) - \sin \chi}{b \cos \chi - \sin \chi} &= a_{21}; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\frac{1 - b \sin \chi - \cos \chi}{b \cos \chi - \sin \chi} = a_{22};$$

$$\frac{b}{b \cos \chi - \sin \chi} = a_{20}.$$

З урахуванням виразів (12) отримуємо систему нелінійних рівнянь другого порядку відносно v та w :

$$\left. \begin{aligned} v^2 + w^2 + a_{11}v + a_{22}w + 1 &= 0; \\ v^2 + w^2 + a_{21}v + a_{22}w + a_{20} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Із системи (13) випливає:

$$v = a_{31}w + a_{30}, \quad (14)$$

$$\text{де } a_{31} = \frac{a_{22} - a_{12}}{a_{11} - a_{21}};$$

$$a_{30} = \frac{a_{20} - 1}{a_{11} - a_{21}}.$$

Підставляємо вираз (14) в перше рівняння системи (13). Отримуємо квадратне рівняння відносно w :

$$w^2 + pw + q = 0, \quad (15)$$

$$\text{де } p = \frac{a_{11}a_{31} + a_{12} + 2a_{31}a_{30}}{1 + a_{31}^2};$$

$$q = \frac{1 + a_{11}a_{30} + a_{30}^2}{1 + a_{31}^2}.$$

Розв'язком рівняння (15) є:

$$w_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}$$

Оскільки w є уявною складовою комплексного коефіцієнта відбиття, то вибирається таке значення кореня, яке по модулю не перевищує одиниці.

З виразу (14) знаходимо значення дійсної складової v комплексного коефіцієнта відбиття $\tilde{\Gamma}$.

Таким чином знайдені параметри визначають модуль Γ і фазу φ_0 коефіцієнта відбиття, який вимірюється.

Якщо обидва корені $w_{1,2}$ по модулю менші одиниці, то розраховують два значення дійсної частини коефіцієнта відбиття $v_{1,2}$. Знову перевіряється значення модулів v_1 та v_2 . Якщо один із них перевищує одиницю, то в подальшому використовують значення w та v , які за модулем менші одиниці.

Коли модулі $|w_{1,2}|$ і $|v_{1,2}|$ не перевищують одиниці, обчислюють суми квадратів знайдених

коренів $v_1^2 + w_1^2$ і $v_2^2 + w_2^2$. Одна з цих сум обов'язково буде меншою одиниці. Отже, така пара значень w та v і визначає коефіцієнт відбиття.

Висновки

Розроблена оригінальна схема двозондового вимірювача комплексного коефіцієнта відбиття, застосування якого дозволяє підвищити точність і розширити частотний діапазон вимірювань.

Список літератури

1. *Захарія Й.А.* Основи надвисокочастотних радіовимірювань. – К.: Вища шк., 1972. – 344 с.
2. *А.с. СССР № 1663577*, кл. G 01 R 27/06, Устройство для измерения коэффициента отражения СВЧ-элемента/ Л.Я. Ильницкий, С.В. Даниленко, Нгина Барбане. Заявлено 26.12.88. Оpubл. 1991. Бюл. № 26.
3. *А.с. СССР № 1758597*, кл. G 01 R 29/08. Способ измерения коэффициента отражения излучающих элементов фазированной антенной решетки./Л.Я. Ильницкий, И.Л. Шимберг. Заявлено 28.03.89. Оpubл. 1992. Бюл. № 32.

Стаття надійшла до редакції 25.06.03.

Л.Я. Ильницкий, В.А. Иванов, В.Т. Богатырь

Двухзондовый измеритель комплексного коэффициента отражения

Рассмотрено двухзондовое устройство, предназначенное для автоматизированного измерения коэффициента отражения в диапазоне сверхвысоких частот. В системе управления работой измерителя основными узлами являются суммарно-разностный мост и микропроцессор.

L.J. Pnitsky, V.A. Ivanov, V.T. Bogatir

The two-probe device for automatic measurement of the reflection coefficient

The two-probe device for automatic measurement of the reflection coefficient in the HF range is proposed and analyzed. The main parts in the instrument control system are the sum-and-difference bridge and the microprocessor.