

УДК 621.317

М. А. Філінюк, д. т. н., проф.;

Д. В. Гаврілов, асп.

## СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОЇ СКЛАДОВОЇ КОМПЛЕКСНОГО ОПОРУ

Більшість відомих способів вимірювання комплексних опорів базується на одночасному визначенні як активної так і реактивної його складових. При цьому, на точність вимірювання активної складової комплексного опору негативно впливає, як реактивна складова комплексного опору так і паразитні реактивності вимірювального кола. Наприклад, використовуючи урівноважені мости, відбувається зменшення точності вимірювань з ростом частоти в зв'язку з неконтрольованою зміною параметрів паразитних реактивних елементів мосту (контактних пристроїв, з'єднувальних провідників, індуктивності активних опорів, міжелементних ємностей), що обмежує їхнє застосування в діапазоні низьких і високих частот [1].

У діапазоні НВЧ найвищу точність мають вимірювання параметрів комплексних опорів шляхом вимірювання амплітуди і фази стоячої хвилі за допомогою вимірювальної лінії [2].

Однак і в цьому способі результат вимірювання активної складової комплексного опору залежить від значення реактивної складової. Особливо це проявляється з використанням для обробки результатів первинної вимірювальної інформації діаграми Вольперта-Сміта [3]. Крім того низька точність даного способу вимірювання також обумовлена впливом реактивності каліброваного пристрою, що повинен забезпечувати в процесі калібрування режим КЗ чи ХХ, що в принципі неможливо реалізувати, внаслідок наявності реактивності каліброваного пристрою.

Виходячи з цього, становить інтерес спосіб вимірювання активної складової комплексного опору, похибка якого не залежала б від його реактивної складової.

В основу способу покладена залежність інваріантного коефіцієнта стійкості невзаємного чотириполюсника від значення комплексних опорів, що підключаються до його входу і виходу [4]

$$K_c = \frac{2\operatorname{Re}(Z_{11} + Z_T)\operatorname{Re}(Z_{22} + Z_H) - \operatorname{Re}(Z_{12}Z_{21})}{|Z_{12}Z_{21}|}, \quad (1)$$

де  $Z_{11}$ ,  $Z_{22}$ ,  $Z_{12}$ ,  $Z_{21}$  — параметри матриці опорів чотириполюсника;  $Z_T$ ,  $Z_H$  — повні опори, підключені до входу і виходу чотириполюсника, відповідно.

Аналіз (1) показує, що інваріантний коефіцієнт стійкості навантаженого чотириполюсника залежить тільки від активних складових  $\operatorname{Re}Z_T$  і  $\operatorname{Re}Z_H$  комплексних опорів, що підключаються до його входу і виходу і не залежить від реактивних складових.

Таким чином, якщо вважати, що комплексний опір підключено тільки до входу чотириполюсника ( $Z_T = Z_X$ ,  $Z_H = 0$ ), вираз (1) приймає вигляд

$$K_{cX} = \frac{2\operatorname{Re}(Z_{11} + Z_X)\operatorname{Re}Z_{22} - \operatorname{Re}(Z_{12}Z_{21})}{|Z_{12}Z_{21}|}. \quad (2)$$

У випадку, якщо підключити замість  $Z_X$  калібрований комплексний опір  $Z_0$  з відомою тільки активною складовою і довільною реактивною складовою, тоді інваріантний коефіцієнт стійкості навантаженого чотириполюсника буде дорівнювати

$$K_{c0} = \frac{2\operatorname{Re}(Z_{11} + Z_0)\operatorname{Re}Z_{22} - \operatorname{Re}(Z_{12}Z_{21})}{|Z_{12}Z_{21}|}. \quad (3)$$

З огляду на те, що внутрішній інваріантний коефіцієнт стійкості чотириполюсника дорівнює [5]

$$K_{\text{с вн.}} = \frac{2\operatorname{Re} Z_{11} \operatorname{Re} Z_{22} - \operatorname{Re}(Z_{12} Z_{21})}{|Z_{12} Z_{21}|}, \quad (4)$$

розв'язуючи (2—4), відносно  $\operatorname{Re} Z_X$ , знаходимо:

$$\operatorname{Re} Z_X = \operatorname{Re} Z_0 \frac{K_{\text{сX}} - K_{\text{с вн.}}}{K_{\text{с0}} - K_{\text{с вн.}}}. \quad (5)$$

Аналіз (5) показує, що для знаходження активної складової комплексного опору досить мати значення інваріантного коефіцієнта стійкості чотириполосника при трьох значеннях  $Z_{\Gamma 1} = Z_X$ ,  $Z_{\Gamma 2} = Z_0$  і  $Z_{\Gamma 3} = 0$ , а також відомому значенні  $\operatorname{Re} Z_0$ .

Найбільші труднощі при цьому викликає визначення інваріантного коефіцієнта стійкості. Відомо кілька способів вимірювання  $K_{\text{с}}$ . Класичним варто вважати спосіб визначення  $K_{\text{с}}$  за результатами вимірювання параметрів матриці опорів чотириполосника. При цьому необхідно визначити чотири комплексні опори чотириполосника, що не тільки має велику трудомісткість, але і неможливо здійснити в діапазоні НВЧ із достатньою точністю [6].

З огляду на те, що при виведенні формули (5) не накладаються вимоги на величину інваріантного коефіцієнта стійкості, можна, реалізуючи спосіб вимірювання  $\operatorname{Re} Z_X$ , обмежитися класом абсолютно стійких чотириполосників ( $K_{\text{с вн.}} > 1$ ). Це дозволяє використовувати у визначенні  $K_{\text{с}}$  спосіб, заснований на вимірюванні номінальних коефіцієнтів прямої  $K_{\text{ном 21}}$  і зворотної  $K_{\text{ном 12}}$  передачі чотириполосника [7]

$$K_{\text{с}} = \frac{1 + K_{\text{ном 21}} K_{\text{ном 12}}}{2\sqrt{K_{\text{ном 21}} K_{\text{ном 12}}}}, \quad (6)$$

де 
$$K_{\text{ном 21}} = \frac{P_{\text{вих.н}}}{P_{\Gamma.н}}; \quad K_{\text{ном 12}} = \frac{P_{\text{вх.н}}}{P_{\Gamma.н}}, \quad (7)$$

$P_{\Gamma.н}$  — потужність генератора, що передається в узгоджене навантаження;  $P_{\text{вих.н}}$  — потужність електромагнітних коливань, що виділяється в дійсній складовій опорі навантаження, у разі подачі сигналу генератора на вхід чотириполосника;  $P_{\text{вх.н}}$  — потужність електромагнітних коливань, що виділяється в дійсній складовій опорі навантаження, що підключений до входу чотириполосника, під час подачі сигналу генератора на вихід чотириполосника.

Підставляючи (7) у (6), знаходимо:

$$K_{\text{с}} = \frac{P_{\Gamma.н}^2 + K_{\text{вх.н1}} K_{\text{вих.н}}}{2P_{\Gamma.н} \sqrt{P_{\text{вх.н}} P_{\text{вих.н}}}}. \quad (8)$$

З (8) випливає, що коли постійна потужність генератора сигналу  $P_{\Gamma.н} = \text{const}$ , вимірювання  $K_{\text{с}}$  зводяться до вимірювання значень потужності сигналу, яка виділяється в дійсному опорі навантаження, при прямій і зворотній передачі сигналу чотириполосником. При цьому основна похибка вимірювання  $K_{\text{с}}$  буде визначатися похибкою вимірювання потужності сигналу, що пройшов через чотириполосник у прямому і зворотному напрямках.

Реалізація вищеописаного способу здійснена з використанням вимірювальної установки [8]. До її складу входять: генератор електромагнітних коливань  $\Gamma$ , вихід якого через перший трансформатор, що узгоджує, з'єднаний із входом першого комутатора  $K1$ . Один з виходів цього комутатора з'єднаний з виходом невзаємного чотириполосника НЧ і першим входом другого комутатора  $K2$ . Вихід комутатора  $K2$  через другий трансформатор, що узгоджує,  $\text{Tr}2$  з'єднаний із входом вимірювача потужності ВП. Другий вихід комутатора  $K1$  з'єднаний із другим входом комутатора  $K2$  і з входом третього комутатора  $K3$ . Вихід комутатора  $K3$  може бути з'єднаний через вимірюваний  $Z_X$  і калібрований  $Z_0$  комплексні опори або безпосередньо з входом вимірюваного чотириполосника.

На першому етапі за допомогою комутаторів  $K1$ - $K3$  електромагнітні коливання подають послідовно через комплексні опори  $Z_X$  і  $Z_0$  чи безпосередньо на вхід невзаємного чотириполосника і

вимірюють значення потужності електромагнітних коливань  $P_{1X}$ ,  $P_{10}$  і  $P_1$ , що надходить у вимірювач потужності з виходу невзаємного чотириполюсника в режимі узгодження, забезпечувано трансформаторами, що узгоджують  $\Gamma_{p1}$  і  $\Gamma_{p2}$ .

На другому етапі за допомогою комутаторів К1—К3 електромагнітні коливання подаються послідовно на вихід невзаємного чотириполюсника і вимірюються значення потужності електромагнітних коливань  $P_{2X}$ ,  $P_{20}$  і  $P_2$ , що надходять у вимірювач потужності з входу невзаємного чотириполюсника послідовно через комплексні опори  $Z_X$  і  $Z_0$  чи безпосередньо в режимі узгодження, що забезпечується трансформаторами, що узгоджують.

Після чого визначаються інваріантні коефіцієнти стійкості навантаженого невзаємного чотириполюсника, відповідно до (8) дорівнюють:

$$K_{cX} = \frac{P_{\Gamma.н}^2 + P_{1X}P_{2X}}{2P_{\Gamma.н}\sqrt{P_{1X}P_{2X}}}; \quad (9)$$

$$K_{c0} = \frac{P_{\Gamma.н}^2 + P_{10}P_{20}}{2P_{\Gamma.н}\sqrt{P_{10}P_{20}}}; \quad (10)$$

$$K_{cвн.} = \frac{P_{\Gamma.н}^2 + P_1P_2}{2P_{\Gamma.н}\sqrt{P_1P_2}}. \quad (11)$$

Підставляючи (8—11) у (5), знаходимо активну складову вимірюваного комплексного опору.

З огляду на те, що у формулі (5) у чисельнику і знаменнику знаходяться різниці величин  $K_c$ , методична похибка способу визначається в основному похибкою завдання  $\operatorname{Re}Z_0$  і не залежить як від реактивностей  $Z_X$  і  $Z_0$ , так і від реактивностей контактотримачів і з'єднуючих дротів. Під час реалізації способу можливе використання пасивного невзаємного чотириполюсника, що, поперше, дозволяє уникнути похибки від нестабільності джерела живлення, що спостерігається, наприклад, використовуючи у вимірювальних схемах операційний підсилювач [9], так і дасть можливість здійснювати вимірювання активних негативних опорів, у наслідок великого запасу стійкості невзаємного чотириполюсника.

Експериментальна установка реалізована з використанням кварцового генератора ГЧ-144, використовувалися трансформатори типу Э1-46, що узгоджують, як невзаємний чотириполюсник застосовувався феритовий вентиль типу Э6-29, вимірювання потужності електромагнітних коливань здійснювалося за допомогою термисторного мосту типу М4-1. Оцінка похибки способу, зроблена в діапазоні частот 0,1...1 ГГц при вимірюванні опорів типу CR0402 і CR0603 з діапазоном значень 10...120 Ом не перевищувала 5 %, з включенням додаткової індуктивності від 3 до 50 нГн.

## Висновки

1. Для знаходження активної складової комплексного опору досить мати значення інваріантного коефіцієнта стійкості чотириполюсника при трьох значеннях  $Z_{\Gamma_1} = Z_X$ ,  $Z_{\Gamma_2} = Z_0$  і  $Z_{\Gamma_3} = 0$ , а також відомому значенні  $\operatorname{Re}Z_0$ .

2. З урахуванням інваріантності виразів (1), (4), (6) до термінів опору і провідності, розглянутий спосіб може бути використаний і для вимірювання активної складової комплексної провідності шляхом заміни у виразі (5) позначень комплексних опорів на комплексні провідності, а у вимірювальній установці — калібровану і вимірювану провідність необхідно включати паралельно входу чотириполюсника.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Добров Е. Е. и др. Раздельное преобразование комплексных сопротивлений. — Львов: изд-во при Львовском государственном университете, 1985. — 254 с.
2. Фрадкин А. З., Рьжов Е. В. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. — М.: Связь, 1972. — 352 с.

3. Смит Ф. Круговые диаграммы в радиоэлектронике. — М.: Связь, 1976. — 142 с.
4. Богачев В. М., Никифоров В. В. Транзисторные усилители мощности. — М.: Энергия, 1978. — 394 с.
5. Rollett J. M. Stability and power gain invariants of linear two-ports // IRE Trans. 1962. — V. 9. — N 1. — P. 29—32.
6. Транзисторы. Параметры, методы измерений и испытаний. Под ред. И. Г. Бергельсона, Н. Ф. Николаевского. — М.: Сов. радио, 1968. — 504 с.
7. Шварц Н. З. К определению инвариантного коэффициента устойчивости НВЧ-транзисторов // Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред А. А. Васенкова и Я. А. Федотова. — М.: Сов. радио, 1976. Вып. 1, — 302—310 с.
8. А. с. 1644048 СССР. Способ измерения активной составляющей комплексного сопротивления / Филинюк Н. А., Опубл. 1988. Бюл. № 15. — С. 167—168
9. Кукуш А. В. Электрорадиоизмерения. — М.: Радио и связь, 1985. — 436 с.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної і телекомунікаційної апаратури

Надійшла до редакції 23.03.04  
Рекомендована до друку 26.04.04

**Філінюк Микола Антонович** — завідувач кафедри, **Гаврілов Дмитро Володимирович** — аспірант.

Кафедра проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет