



УКРАЇНА

(19) UA (11) 53004 (13) A

(51) 7 G01R27/28

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДВидається під
відповідальність
власника
патенту**(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ МІНІМАЛЬНО ДОСЯЖНОГО ВХІДНОГО АКТИВНОГО ОПОРУ ЧОТИРИПОЛЮСНИКА**

1

2

(21) 2002010719**(22)** 29 01 2002**(24)** 15 01 2003**(46)** 15 01 2003, Бюл № 1, 2003 р**(72)** Філінюк Микола Антонович, Гаврилов Дмитро Володимирович**(73)** ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(57) Спосіб вимірювання мінімальнодосяжного вхідного активного опору чотириполюсника, що включає подачу електромагнітних коливань постійної потужності і частоти на вхід невізаємного чотириполюсника з включеним у вхідне коло комплексним опором і вимірювання потужності електромагнітних коливань на його виході, який відрізняється тим, що спочатку узгоджують опір генератора електромагнітних коливань із вхідним опором невізаємного чотириполюсника, із включеним у вхідне коло першим комплексним опором із відомою дійсною частиною, узгоджують вихідний опір невізаємного чотириполюсника з опором вимірювача потужності і заміряють потужність електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності, потім від входу невізаємного чотириполюсника відключають перший комплексний опір і підключають другий комплексний опір із відомою дійсною частиною, здійснюють узгодження генератора електромагнітних коливань із вхідним опором невізаємного чотириполюсника, із включеним у його вхідне коло другим комплексним опором із відомою дійсною частиною, здійснюють узгодження вихідного опору невізаємного чотириполюсника з опором вимірювача потужності і заміряють потужність електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності, потім підключають генератор електромагнітних коливань до виходу невізаємного чотириполюсника, а вимірювач потужності підключають до виходу невізаємного чотириполюсника з включеним другим комплексним опором із відомою дійсною частиною, здійснюють узгодження опору генератора електромагнітних коливань із вихідним опором невізаємного чотириполюсника й узгодження вимірювача потужності з вхідним

опором невізаємного чотириполюсника з включеним у вхідне коло другим комплексним опором із відомою дійсною частиною і заміряють потужність електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності, потім від входу невізаємного чотириполюсника відключають другий комплексний опір із відомою дійсною частиною і підключають перший комплексний опір із відомою дійсною частиною, здійснюють узгодження опору генератора електромагнітних коливань із вихідним опором невізаємного чотириполюсника й узгодження опору вимірювача потужності з вхідним опором невізаємного чотириполюсника з включеним у вхідне коло першим комплексним опором, заміряють потужність електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності, а шуканий параметр визначають за формулою

$$\operatorname{Re} Z_{\text{вих мін}} = \frac{\operatorname{Re} Z_2(K_{C1} - 1) - \operatorname{Re} Z_1(K_{C2} - 1)}{K_{C1} - K_{C2}},$$

де Z_1 і Z_2 - перший і другий комплексний опір із відомою дійсною частиною,

$$K_{C1} = \frac{P_{\Gamma}^2 + P_{11}P_{12}}{2P_{\Gamma}\sqrt{P_{11}P_{12}}},$$

$$K_{C2} = \frac{P_{\Gamma}^2 + P_{21}P_{22}}{2P_{\Gamma}\sqrt{P_{21}P_{22}}},$$

де P_{Γ} - потужність електромагнітних коливань, що подаються на клемі невізаємного чотириполюсника, P_{11} , P_{21} - значення потужності електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності з виходу невізаємного чотириполюсника в режимі двостороннього узгодження, відповідно, при підключенні до входу чотириполюсника першого Z_1 і другого Z_2 комплексних опорів із відомою дійсною частиною, P_{12} , P_{22} - значення потужності електромагнітних коливань, що надходять на вихід вимірювача потужності з входу невізаємного чотириполюсника в режимі двостороннього узгодження, відповідно, при підключенні до входу невізаємного чотириполюсника першого Z_1 і другого Z_2 комплексних опорів із відомою дійсною частиною

(13) A

(11) 53004

(19) UA

Винахід відноситься до області електроніки, зокрема до вимірювальної техніки визначення параметрів чотириполіусників

Відомим є спосіб визначення мінімально-досяжного дійсного імпеданса чотириполіусника

$$\operatorname{Re}W_{\text{вих min}} = \operatorname{Re}W_{22} - \frac{|W_{12}W_{21}| + \operatorname{Re}(W_{12}W_{21})}{2\operatorname{Re}W_{11}}$$

за результатами виміру його W - параметрів $\operatorname{Re}W_{22}$, $\operatorname{Re}W_{11}$, $|W_{12}W_{21}|$ і $\operatorname{Re}(W_{12}W_{21})$, де під W - параметрами припускається будь-яка з чотирьох систем y -, z -, h - або g - параметрів (див В М Богачев, В В Никифоров Транзисторные усилители мощности -М Энергия, 1978, с 20, ф-ла (1-23)

Недоліком даного способу є його низька точність, пов'язана з великою похибкою виміру W - параметрів чотириполіусників у діапазоні НВЧ (див Транзисторы Параметры, методы измерений и испытаний /Под ред И Г Бергеньсона, Ю А Каменецкого, Н Ф Николаевского -М Сов радио, 1968, -504с)

Найбільше близьким до запропонованого рішення є спосіб вимірювання дійсної частини комплексного опору, що включає подачу електромагнітних коливань постійної потужності і частоти на вхід невідомого чотириполіусника з включеним у вхідне коло комплексним опором і вимір потужності електромагнітних коливань на його виході (В Д Кукуш Электрорадиоизмерения, -М Радио и связь, 1985, с 301)

Недоліком даного способу є його низька точність, обумовлена впливом на результат вимірів внутрішнього опору джерела електромагнітних коливань, ріст похибки вимірів при зменшенні коефіцієнта підсилення невідомого чотириполіусника в результаті порушення умови $K\beta \gg 1$ (де K і β - коефіцієнти підсилення і зворотного зв'язку невідомого чотириполіусника, відповідно), а також підвищенням похибки вимірювання із ростом частоти, тому що в цьому випадку коефіцієнти передачі невідомого чотириполіусника K і кола його зворотного зв'язку β стають комплексними, що вносить додаткову похибку й обмежує частотний діапазон способу Недоліком засобу є також наявність похибки виміру активної складової комплексного опору внаслідок впливу на результат виміру індуктивностей виводів і контактної пристрою

В основу винаходу поставлено задачу створення способу виміру мінімально-досяжного вхідного дійсного опору чотириполіусника шляхом проведення додаткових операцій вимірювання потужності електромагнітних коливань, що проходять через невідомий чотириполіусник у режимі його двостороннього узгодження при підключенні різноманітних комплексних опорів на його вході, що забезпечує підвищення точності і

розширення частотного діапазону вимірювань

Поставлена задача вирішується тим, що в способі вимірювання мінімально-досяжного дійсного імпеданса чотириполіусника (вхідного активного опору чотириполіусника), що включає подачу електромагнітних коливань постійної потужності і частоти на вхід невідомого чотириполіусника з включеним у вхідне коло комплексним опором і вимірюванням потужності електромагнітних коливань на його виході спочатку узгоджують опір генератора електромагнітних коливань із вхідним опором невідомого чотириполіусника, із включеним у вхідне коло першим комплексним опором із відомою дійсною частиною, узгоджують вихідний опір невідомого чотириполіусника з опором вимірювача потужності і вимірюють потужність електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності, потім від входу невідомого чотириполіусника відключають перший комплексний опір і підключають другий комплексний опір із відомою дійсною частиною, здійснюють узгодження опору генератора електромагнітних коливань із вхідним опором невідомого чотириполіусника, із включеним у його вхідне коло комплексним опором із відомою дійсною частиною, здійснюють узгодження вихідного опору невідомого чотириполіусника з опором вимірювача потужності і заміряють потужність електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності, потім підключають генератор електромагнітних коливань до виходу невідомого чотириполіусника, а вимірювач потужності підключають до входу невідомого чотириполіусника з включеним другим комплексним опором із відомою дійсною частиною, здійснюють узгодження опору генератора електромагнітних коливань із вихідним опором чотириполіусника й узгодження опору вимірювача потужності з вхідним опором чотириполіусника з включеним у вхідне коло другим комплексним опором із відомою дійсною частиною і заміряють потужність електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності, потім від входу невідомого чотириполіусника відключають другий комплексний опір з відомою дійсною частиною і підключають перший комплексний опір із відомою дійсною частиною, здійснюють узгодження опорів генератора електромагнітних коливань із вихідним опором невідомого чотириполіусника й узгодження опору вимірювача потужності з вхідним опором невідомого чотириполіусника з включеним у вхідне коло першим комплексним опором, заміряють потужність електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності, а шуканий параметр визначають по формулі

$$\operatorname{Re} Z_{\text{вих min}} = \frac{\operatorname{Re} Z_2(K_{C1} - 1) - \operatorname{Re} Z_1(K_{C2} - 1)}{K_{C1} - K_{C2}}$$

де Z_1 і Z_2 - перший і другий комплексний опір із відомою дійсною частиною,

$$K_{C1} = \frac{P_{\Gamma}^2 + P_{11}P_{12}}{2P_{\Gamma}\sqrt{P_{11}P_{12}}},$$

$$K_{C2} = \frac{P_{\Gamma}^2 + P_{21}P_{22}}{2P_{\Gamma}\sqrt{P_{21}P_{22}}},$$

де P_{Γ} - потужність електромагнітних коливань, що подаються на клеми невазємного чотириполіюсника,

P_{11} , P_{12} - значення потужності електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності з виходу невазємного чотириполіюсника в режимі двостороннього узгодження, відповідно, при підключенні до входу чотириполіюсника першого Z_1 і другого Z_2 комплексних опорів із відомою дійсною частиною,

P_{12} , P_{22} - значення потужності електромагнітних коливань, що надходять на вхід вимірювача потужності з входу невазємного чотириполіюсника в режимі двостороннього узгодження, відповідно, при підключенні до входу чотириполіюсника першого Z_1 і другого Z_2 комплексних опорів із відомою дійсною частиною

Установка містить (див фіг) генератор електромагнітних коливань 1, вихід якого через перший трансформатор 2, що узгоджує, з'єднаний із входом першого комутатора 3. Один із виходів першого комутатора 3 з'єднаний із виходом невазємного чотириполіюсника 4 і першим входом другого комутатора 5. Вихід другого комутатора 5 через другий трансформатор 6, що узгоджує, з'єднаний із входом вимірювача потужності 7. Другий вихід першого комутатора 3 з'єднаний із другим входом другого комутатора 5 і з входом третього комутатора 8. Перший вихід третього комутатора 8 з'єднаний через перший комплексний опір 9 із відомою дійсною складовою з входом невазємного чотириполіюсника 4, другий вихід третього комутатора 8 через другий комплексний опір 10 з'єднаний із входом невазємного чотириполіюсника 4.

Спосіб здійснюється наступним чином. Від генератора 1 подають електромагнітні коливання постійної потужності і частоти через трансформатор 2, що узгоджує, і перший комутатор 3 на вхід третього комутатора 8 вихід якого через перший комплексний опір 9 з'єднується з входом невазємного чотириполіюсника 4. Вихід невазємного чотириполіюсника 4 за допомогою комутатора 5 через другий трансформатор 6, що узгоджує, з'єднується з входом вимірювача потужності 7. Потім за допомогою трансформаторів 2 і 6, що узгоджують, встановлюється режим узгодження опору генератора електромагнітних коливань 1 із вхідним опором невазємного чотириполіюсника 4 при включеному в його вхідне коло першим комплексним опором 9 і узгодження опору вимірювача потужності 7 із вихідним опором невазємного чотириполіюсника 4 і в цьому режимі вимірюють потужність P_{11} електромагнітних

коливань на його виході. Потім за допомогою комутатора 8 електромагнітні коливання генератора 1 падає через другий комплексний опір 10 із відомою дійсною складовою на вхід невазємного чотириполіюсника, за допомогою трансформаторів 2 і 6, що узгоджують, встановлюється режим узгодження опору генератора 1 із вхідним опором невазємного чотириполіюсника 4 при включеному в його вхідне коло другим комплексним опором 10 із відомою дійсною складовою, і узгодження опору вимірювача потужності 7 із вихідним опором невазємного чотириполіюсника 4, і в цьому режимі вимірюють потужність P_{11} електромагнітних коливань на його виході. Потім за допомогою комутатора 8 електромагнітні коливання генератора 1 падає через другий комплексний опір 10 із відомою дійсною складовою на вхід невазємного чотириполіюсника, за допомогою трансформаторів 2 і 6, що узгоджують, встановлюється режим узгодження опору генератора 1 із вхідним опором невазємного чотириполіюсника 4 при включеному в його вхідне коло другим комплексним опором 10 із відомою дійсною складовою, і узгодження опору вимірювача потужності 7 із вихідним опором невазємного чотириполіюсника 4, і в цьому режимі вимірює потужність P_{21} електромагнітних коливань на його виході.

Потім електромагнітні коливання генератора 1 через перший трансформатор 2, що узгоджує, і перший комутатор 3 подаються на вихід невазємного чотириполіюсника 4, а вимірювач потужності 7 через другий трансформатор 6, що узгоджує, і комутатор 5 підключається до входу третього комутатора 8 і здійснюють вимірювання потужності P_{12} і P_{22} електромагнітних коливань на вході невазємного чотириполіюсника 4 у режимі узгодження опору генератора 1 електромагнітних коливань із вихідним опором невазємного чотириполіюсника і узгодження опору вимірювача потужності 7 із вхідним опором невазємного чотириполіюсника при послідовному підключенні за допомогою третього комутатора 8 першого 9 і другого 10 комплексних опорів із відомою дійсною складовою.

Тепер, по виміряним значеннях потужностей P_{11} , P_{21} , P_{12} , P_{22} мінімально-досяжний дійсний імітанс чотириполіюсника може бути визначений, по формулі

$$\operatorname{Re} Z_{\text{вих min}} = \frac{\operatorname{Re} Z_2(K_{C1} - 1) - \operatorname{Re} Z_1(K_{C2} - 1)}{K_{C1} - K_{C2}}$$

$$K_{C1} = \frac{P_{\Gamma}^2 + P_{11}P_{12}}{2P_{\Gamma}\sqrt{P_{11}P_{12}}},$$

$$K_{C2} = \frac{P_{\Gamma}^2 + P_{21}P_{22}}{2P_{\Gamma}\sqrt{P_{21}P_{22}}},$$

де Z_1 і Z_2 - перший і другий комплексний опір із відомою дійсною частиною,

P_{Γ} - потужність електромагнітних коливань, що подаються на клеми невазємного чотириполіюсника,

Відомо, що мінімально-досяжний дійсний імітанс чотириполіюсника визначається виразом

(див В И Богачев Транзисторные усилители мощности -М Энергия, 1978г с 20, ф-ла(1-23)

$$\operatorname{Re} Z_{\text{вих min}} = \operatorname{Re} Z_{22} - \frac{|Z_{12}Z_{21}| + \operatorname{Re}(Z_{12}Z_{21})}{2\operatorname{Re}Z_{11}} \quad (1)$$

Внутрішній інваріантний коефіцієнт стійкості чотириполосника дорівнює (див Куликовський А А Устойчивость активных линеаризованных цепей с усилительными приборами новых типов -М Госэнергоиздат, 1962 192с)

$$K_{\text{св}} = \frac{\operatorname{Re}Z_{11}\operatorname{Re}Z_{22} - \operatorname{Re}(Z_{12}Z_{21})}{|Z_{12}Z_{21}|} \quad (2)$$

Підставляючи (2) у (1), знаходимо

$$\operatorname{Re} Z_{\text{вих min}} = \frac{|Z_{12}Z_{21}|}{2\operatorname{Re}Z_{11}} (K_{\text{св}} - 1) \quad (3)$$

У випадку, якщо на виході чотириполосника навантаження $Z_{\text{н}}=0$, а на вході послідовно включаються опори Z_1 і Z_2 , інваріантний коефіцієнт стійкості чотириполосника буде дорівнює (див В И Богачев В В Никифоров Транзисторные усилители мощности -М Энергия, 1978, -с 25)

$$K_{\text{с1}} = \frac{\operatorname{Re}(Z_{11} + Z_1)\operatorname{Re}Z_{22} - \operatorname{Re}(Z_{12}Z_{21})}{|Z_{12}Z_{21}|} \quad (4)$$

$$K_{\text{с2}} = \frac{\operatorname{Re}(Z_{11} + Z_2)\operatorname{Re}Z_{22} - \operatorname{Re}(Z_{12}Z_{21})}{|Z_{12}Z_{21}|} \quad (5)$$

Вирішуючи (2, 4, 5), знаходимо

$$K_{\text{св}} = \frac{K_{\text{с2}}\operatorname{Re}Z_1 - K_{\text{с1}}\operatorname{Re}Z_2}{\operatorname{Re}Z_1 - \operatorname{Re}Z_2} \quad (6)$$

$$\frac{|Z_{12}Z_{21}|}{2\operatorname{Re}Z_{11}} = \frac{\operatorname{Re}Z_1 - \operatorname{Re}Z_2}{K_{\text{с1}} - K_{\text{с2}}} \quad (7)$$

Підставляючи (6) і (7) у (3), одержимо

$$\operatorname{Re} Z_{\text{вих min}} = \frac{\operatorname{Re}Z_2(K_{\text{с1}} - 1) - \operatorname{Re}Z_1(K_{\text{с2}} - 1)}{K_{\text{с1}} - K_{\text{с2}}} \quad (8)$$

У такий спосіб із (8) впливає, що для знаходження $\operatorname{Re}Z_{\text{вих min}}$ при відомих $\operatorname{Re}Z_1$ і $\operatorname{Re}Z_2$, достатньо виміряти інваріантні коефіцієнти стійкості $K_{\text{с1}}$ і $K_{\text{с2}}$, які можна визначити за результатами вимірювання потужності сигналу, що пройшов через чотириполосник у прямому й зворотному напрямках, при його двосторонньому узгодженні

Дійсно, при подачі електромагнітних коливань на вхід невазємного чотириполосника 4 із включеним на його вході першим комплексним опором 9, опір якого узгоджено з опором генератора 1, а опір вимірювача потужності 7 узгоджено з вихідним опором невазємного чотириполосника 4, потужність сигналу на його виході буде дорівнювати

$$P_{11} = P_1 K_{\text{ном1}} \quad (9)$$

де $K_{\text{ном1}}$ - номінальний коефіцієнт прямої передачі невазємного чотириполосника по потужності (див В И Богачев Транзисторные усилители мощности -М Энергия, 1978г, с 11)

При подачі електромагнітних коливань генератора 1 на вихід чотириполосника з включеним на його вході першим комплексним опором у режимі узгодження, потужність сигналу

на його вході дорівнює

$$P_{12} = P_1 K_{\text{ном2}} \quad (10)$$

де $K_{\text{ном2}}$ - номінальний коефіцієнт зворотної передачі невазємного чотириполосника по потужності

Аналогічні співвідношення одержуємо для режиму узгодження у випадку включення на вході невазємного чотириполосника другого комплексного опору 10 із відомою дійсною складовою

$$P_{21} = P_1 K_{\text{ном10}} \quad (11)$$

$$P_{22} = P_1 K_{\text{ном20}} \quad (12)$$

Відомо (див Н А Филинук Активные СВЧ фильтры на транзисторах -М Радио и связь, 1987, -с 13)

$$K_{\text{ном1}} = \frac{Z_{21}}{Z_{12}} \left(K_{\text{с1}} - \sqrt{K_{\text{с1}}^2 - 1} \right) \quad (13)$$

$$K_{\text{ном2}} = \frac{Z_{12}}{Z_{21}} \left(K_{\text{с1}} - \sqrt{K_{\text{с1}}^2 - 1} \right) \quad (14)$$

$$K_{\text{ном10}} = \frac{Z_{21}}{Z_{12}} \left(K_{\text{с2}} - \sqrt{K_{\text{с2}}^2 - 1} \right) \quad (15)$$

$$K_{\text{ном20}} = \frac{Z_{12}}{Z_{21}} \left(K_{\text{с2}} - \sqrt{K_{\text{с2}}^2 - 1} \right) \quad (16)$$

де Z_{21} , Z_{12} - опори прямої і зворотної передачі чотириполосника,

Вирішуючи (13-16) щодо $K_{\text{с1}}$ і $K_{\text{с2}}$, з урахуванням (9-12), знаходимо

$$K_{\text{с1}} = \frac{P_1^2 + P_{11}P_{12}}{2P_1\sqrt{P_{11}P_{12}}} \quad (17)$$

$$K_{\text{с2}} = \frac{P_1^2 + P_{21}P_{22}}{2P_1\sqrt{P_{21}P_{22}}} \quad (18)$$

З виразів (8, 17-18) видно, що похибка вимірювання мінімально-досяжного дійсного опору чотириполосника визначається тільки похибкою визначення дійсної складової $\operatorname{Re}Z_1$, $\operatorname{Re}Z_2$ першого і другого комплексних опорів, стабільністю потужності генератора P_1 і похибкою вимірювання потужності електромагнітних коливань (P_{11} , P_{12} , P_{21} , P_{22}) що пройшли через невазємний чотириполосник 4

Найбільш істотне зниження похибки вимірювань досягається за рахунок того, що в запропонованому способі результат вимірювання не залежить від реактивної складової вхідного опору чотириполосника, що дозволяє уникнути впливу паразитних індуктивностей виводів і контактотримачів 3 огляду на те, що у формулі (8) у чисельнику і знаменнику знаходяться різниці величин, що залежать від потужності вимірюваних електромагнітних коливань методична похибка методу визначаються в основному похибкою завдання $\operatorname{Re}Z_1$ і $\operatorname{Re}Z_2$

На відмінність від способу прототипу, точність вимірювань не залежить від внутрішнього опору генератора електромагнітних коливань, від коефіцієнта передачі невазємного чотириполосника і від частоти, що дозволяє

використовувати спосіб у широкому діапазоні частот

Перевагою запропонованого способу також є, те що немає необхідності здійснювати вимір фази електромагнітних коливань, що спрощує реалізацію засобу і зменшує похибку вимірювань

У випадку, якщо необхідно, щоб одна з клем комплексного опору, що вимірюється була з'єднана загальною шиною, тоді в процесі

вимірювань, комплексні опори Z_1 і Z_2 , по черзі включаються паралельно входу невзаємного чотириполюсника, послідовність операцій способу і його режимів зберігаються, а у виразі (18) терміни опору замінюються термінами провідності, тому що початкові вирази (1-5) інваріантні до системи Y, Z, h - параметрів (див В И Богачев В В Никифоров Транзисторные усилители мощности -М Энергия, 1978, -с 22)

