

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.317.612

М. А Філінюк, д. т. н., проф. ;
К. В. Огородник, асп.

ОЦІНКА МЕТОДИЧНИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ S-ПАРАМЕТРІВ ЧОТИРИПОЛЮСНИКА

Запропоновано новий спосіб вимірювання нестандартної системи S-параметрів чотириполіусника, наведено результати експериментальної перевірки запропонованого способу та результати оцінки методичних похибок вимірювання кожного з S-параметрів. Запропонований спосіб має меншу трудомісткість в порівнянні з класичними методами та може використовуватись у всьому діапазоні НВЧ.

Постановка задачі

Для розрахунку багатьох електронних схем, а зокрема, і для опису чотириполіусників отримала широке застосування система S-параметрів (параметрів матриці розсіювання) [1]. Основною перевагою цих параметрів є те, що кожний з них має зрозумілий фізичний зміст. Основним недоліком — складність вимірювання з необхідною точністю. З переходом у діапазон НВЧ похибка вимірювання цих параметрів зростає.

Похибка наявних методів вимірювання системи S-параметрів [1, 2] складає понад 20 % і пов'язана з необхідністю двостороннього узгодження кінцевих навантажень, наявністю у вимірювальному тракці коаксіально-смугових переходів і інших неоднорідностей, що призводить до істотних помилок, і, як наслідок, до хибного розрахунку параметрів електронних схем.

Зважаючи на сказане, в роботі [3] запропоновано спосіб вимірювання системи нестандартних S-параметрів чотириполіусника, що відрізняється від відомих своєю простотою. Розрахунки з використанням нестандартних S-параметрів є більш точними, оскільки вихідна інформація добувається безпосередньо з вимірювань значень коефіцієнтів відбиття, що виконуються з високою точністю.

Теоретичне обґрунтування способу таке. На першому етапі вирішується задача визначення трьох S-параметрів нестандартної системи: S_{11} , S_{22} і $S_{12}S_{21}$. З огляду на те, що ці параметри в загальному випадку комплексні величини, для їх визначення необхідна система із шести незалежних рівнянь. Даній вимозі відповідає система [1]

$$\begin{cases} \Gamma_{\text{вх1}} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_{\text{н1}}}{1 - S_{22}\Gamma_{\text{н1}}}; \\ \Gamma_{\text{вх2}} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_{\text{н2}}}{1 - S_{22}\Gamma_{\text{н2}}}; \\ \Gamma_{\text{вих1}} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_{\text{г1}}}{1 - S_{11}\Gamma_{\text{г1}}}, \end{cases} \quad (1)$$

де $\Gamma_{\text{н1}}$, $\Gamma_{\text{н2}}$, $\Gamma_{\text{г1}}$ — комплексні коефіцієнти відбиття фіксованих значень навантажень $Z_{\text{н1}}$, $Z_{\text{н2}}$ і генератора $Z_{\text{г1}}$; $\Gamma_{\text{вх1}}$, $\Gamma_{\text{вх2}}$ — значення комплексних коефіцієнтів відбиття на вході чотириполіусника для значень $\Gamma_{\text{н1}}$, $\Gamma_{\text{н2}}$ комплексних коефіцієнтів відбиття навантажень, відповідно; $\Gamma_{\text{вих1}}$

— значення комплексного коефіцієнта відбиття на виході чотириполосника для значення Γ_{r1} комплексного коефіцієнта відбиття генератора;

S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{21} — параметри матриці розсіювання чотириполосника.

Розв'язок системи (1) дозволяє отримати вирази для шуканих нестандартних S -параметрів:

$$S_{11} = \frac{\Gamma_{vx1}\Gamma_{n2}(\Gamma_{n1}\Gamma_{vix1} - 1) + \Gamma_{vx2}(\Gamma_{vx1}\Gamma_{n2}\Gamma_{r1} - \Gamma_{n1}(\Gamma_{vx1}\Gamma_{r1} + \Gamma_{vix1}\Gamma_{n2} - 1))}{\Gamma_{n1} - \Gamma_{n2} + \Gamma_{vx2}\Gamma_{n2}\Gamma_{r1} - \Gamma_{vx1}\Gamma_{n1}\Gamma_{r1} + \Gamma_{r1}(\Gamma_{vx1} - \Gamma_{vx2})\Gamma_{n1}\Gamma_{n2}\Gamma_{vix1}}, \quad (2)$$

$$S_{22} = \frac{(\Gamma_{n2} - \Gamma_{n1})\Gamma_{vix1} + \Gamma_{r1}(\Gamma_{vx1} - \Gamma_{vx1}\Gamma_{vix1}\Gamma_{n2} + \Gamma_{vx2}(\Gamma_{vix1}\Gamma_{n1} - 1))}{\Gamma_{n2} - \Gamma_{vx2}\Gamma_{n2}\Gamma_{r1} + \Gamma_{n1}(\Gamma_{r1}(\Gamma_{vx1} - \Gamma_{vx1}\Gamma_{vix1}\Gamma_{n2} + \Gamma_{vx2}\Gamma_{vix1}\Gamma_{n2}) - 1)}, \quad (3)$$

$$S_{12}S_{21} = \frac{(\Gamma_{vx1}\Gamma_{-vx2})(\Gamma_{n1} - \Gamma_{n2})(\Gamma_{vx1}\Gamma_{r1} - 1)(\Gamma_{vx2}\Gamma_{r1} - 1)(\Gamma_{vix1}\Gamma_{n1} - 1)(\Gamma_{vix1}\Gamma_{n2} - 1)}{(\Gamma_{n2} - \Gamma_{vx2}\Gamma_{n2}\Gamma_{r1} + \Gamma_{n1}(\Gamma_{r1}(\Gamma_{vx1} - \Gamma_{vx1}\Gamma_{vix1}\Gamma_{n2} + \Gamma_{vx2}\Gamma_{vix1}\Gamma_{n2}) - 1))^2}. \quad (4)$$

На другому етапі, можна показати, що за допомогою параметра $S_{12}S_{21}$ та виміряного значення максимального-досяжного коефіцієнта підсилення чотириполосника K_{ms} [4], розрахунок значень інших нестандартних параметрів системи $|S_{12}S_{21}|$, $|S_{12}|$ і $|S_{21}|$ не викликає труднощів. Але це не є предметом даної роботи.

Очевидними перевагами розглянутого способу вимірювання нестандартної системи S -параметрів чотириполосника є, по-перше, простота, і, по-друге, відсутність необхідності двостороннього узгодження під час вимірювання комплексних коефіцієнтів відбиття.

В роботі ставиться задача дослідження похибок визначення трьох параметрів нестандартної системи S_{11} , S_{22} і $S_{12}S_{21}$ за запропонованим опосередкованим способом їх вимірювання.

Теоретичне обґрунтування оцінки методичних похибок способу

Результат Z будь-якого непрямого вимірювання визначається розрахунком за виміряними значеннями x_1, x_2, \dots, x_k і заздалегідь відомою функцією $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$. Оскільки кожне значення x_j , де $j = 1, \dots, k$, виміряне з відповідною похибкою γ_j , то задача розрахунку похибки γ_Z результату Z непрямих вимірювань зводяться до підсумовування всіх k похибок вимірювання x_j .

Оскільки можливі функції $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ і співвідношення x_j можуть бути різноманітними, то для визначення чутливості похибки Z до зміни похибок x_j використовуємо відомий прийом [5], що полягає у визначенні частинних похідних

$$\frac{\partial Z}{\partial x_j} = \frac{\partial [f(x_1, \dots, x_k)]}{\partial x_j}. \quad (5)$$

Отримані таким шляхом значення $\partial Z / \partial x_j$ в даному випадку x_1, x_2, \dots, x_k є вагами, з якими в сумарну абсолютну похибку ΔZ входять складові у вигляді абсолютних похибок вимірювання кожного з x_j . Звідси складова абсолютної похибки $\Delta_j(Z)$, що виникає від абсолютної похибки $\Delta(x_j)$, буде $\Delta_j(Z) = (\partial Z / \partial x_j)\Delta(x_j)$. Аналогічно цьому, якщо відомі середньоквадратичні відхилення (с. к. в.) випадкової абсолютної похибки $\sigma(x_j)$ окремих x_j , то с. к. в. відповідних складових результуючої абсолютної похибки ΔZ буде $\sigma_j(Z) = (\partial Z / \partial x_j) \cdot \sigma(x_j)$. Використовувані в процесі вимірювань величини x_j є некорельованими, тому с. к. в. похибки непрямих вимірювань визначають з використанням відомого співвідношення [5]

$$\sigma(Z) = \sqrt{\sum_1^k \sigma_j^2(Z)} = \sqrt{\sum_1^k \left(\frac{\partial Z}{\partial x_j} \right)^2 \sigma^2(x_j)}. \quad (6)$$

З огляду на те, що метод частинних похідних для розрахунку результуючої похибки результату Z непрямих вимірювань правомірний тільки для абсолютних похибок, відносні значення необхідно знаходити таким чином:

$$\delta_j = a_j \frac{\sigma_j(x_j)}{x_j}, \quad (7)$$

де a_j — коефіцієнти, обумовлені заданою довірчою імовірністю і законом розподілу параметрів x_j .

Виходячи з вищесказаного запропоновано такий алгоритм розрахунку відносної зведеної похибки $\sigma(Z)$ визначення кожного з параметрів S_{11} , S_{22} і $S_{12}S_{21}$.

На першому етапі, виходячи з отриманих виразів (2—4), розраховуємо в загальному вигляді частинні похідні згідно з виразом (5).

На другому етапі, використовуючи довідкове значення δ_j і задаючись граничним значенням величини x_{jn} , на підставі (7) знаходимо $\sigma_j(x_j)$:

$$\sigma_j(x_j) = \frac{\delta_j x_{jn}}{a_j}. \quad (8)$$

На третьому етапі, підставляючи розраховані значення частинних похідних і значення, отримані з виразу (8) у (6) розраховуємо с. к. в. $\sigma(Z)$ кожного з параметрів.

На четвертому етапі, підставляючи $\sigma(Z)$ у (7) і задаючись межею вимірювання шуканого параметра, знаходимо зведене значення відносної похибки вимірювання кожного з параметрів.

Оцінка похибки визначення параметрів

З (2) виразимо модуль $|S_{11}|$ та фазу $\varphi_{S_{11}}$ комплексного параметра S_{11} (отримані вирази до сь об'ємні і не наводяться в даній роботі через обмеженість її обсягу). Спочатку оцінимо похибку визначення модуля $|S_{11}|$. Оскільки кількість параметрів, що впливають на загальну похибку визначення цього модуля $\delta_{|S_{11}|}$, рівна шести: Γ_{H1} , Γ_{H2} , $\Gamma_{Г1}$, $\Gamma_{ВХ1}$, $\Gamma_{ВХ2}$, $\Gamma_{ВІХ1} \dots$ (а в разі виділення модуля та фази кожного з них рівна дванадцяти: $|\Gamma_{H1}|$, $|\Gamma_{H2}|$, $|\Gamma_{Г1}|$, $|\Gamma_{ВХ1}|$, $|\Gamma_{ВХ2}|$, $|\Gamma_{ВІХ1}|$, φ_{H1} , φ_{H2} , $\varphi_{Г1}$, $\varphi_{ВХ1}$, $\varphi_{ВХ2}$, $\varphi_{ВІХ1}$), то доцільно дослідити вплив похибки $\sigma_j(x_j)$ визначення кожного з них на величину загальної похибки. Для цього будемо вважати, що п'ять з шести параметрів x_j є ідеальними, а в результаті вимірювання модуля та фази параметра, що залишився, послідовно штучно вводимо дискретну відносну похибку в діапазоні від 0 до 10 % з кроком 2 %. Дослідимо вплив на загальну похибку визначення модуля $|S_{11}|$ похибки визначення параметра $\Gamma_{ВХ1}$. Для цього експериментальним шляхом отримуємо: $|\Gamma_{H1}| = 0,8$; $|\Gamma_{H2}| = 0,7$; $|\Gamma_{Г1}| = 0,6$; $\varphi_{H1} = 25\pi/180$; $\varphi_{H2} = 45\pi/180$; $\varphi_{Г1} = 65\pi/180$; $|\Gamma_{ВХ1}| = 0,7889$; $|\Gamma_{ВХ2}| = 0,7985$; $|\Gamma_{ВІХ1}| = 1,0034$; $\varphi_{ВХ1} = -7,6577\pi/180$; $\varphi_{ВХ2} = -8,02012\pi/180$; $\varphi_{ВІХ1} = -1,218\pi/180$ (в якості чотириполосника використовувався біполярний транзистор типу КТ391, включений за схемою з загальною базою, робоча точка якого вибиралася в активній області вихідної ВАХ для $I_K = 5$ мА, $U_{КБ} = 5$ В). Виконуємо послідовно дії алгоритму, описаного в попередньому пункті: знаходимо частинні похідні $\partial |S_{11}| / \partial |\Gamma_{ВХ1}|$ і $\partial |S_{11}| / \partial \varphi_{ВХ1}$; припускаємо нормальний закон розподілу параметрів x_j , для якого значення коефіцієнта $a_j = 3$; задаємо граничні значення величин $|\Gamma_{ВХ1}|_n = 0,9$; $\varphi_{ВХ1n} = 170\pi/180$; за виразом (8) знаходимо с. к. в. окремих вимірювань для кожного з значень дискретної відносної похибки визначення модуля та фази $\Gamma_{ВХ1}$ в діапазоні від 0 до 10 % з кроком 2 %; скориставшись виразами (6) та (7) і задавши граничне значення величини $|S_{11}|_n = 1$, отрима-

ємо шукані оціночні значення відносної похибки визначення модуля $|S_{11}|$ в залежності від похибки визначення $\Gamma_{\text{вх}1}$, на підставі яких побудовано графік (рис. 1а).

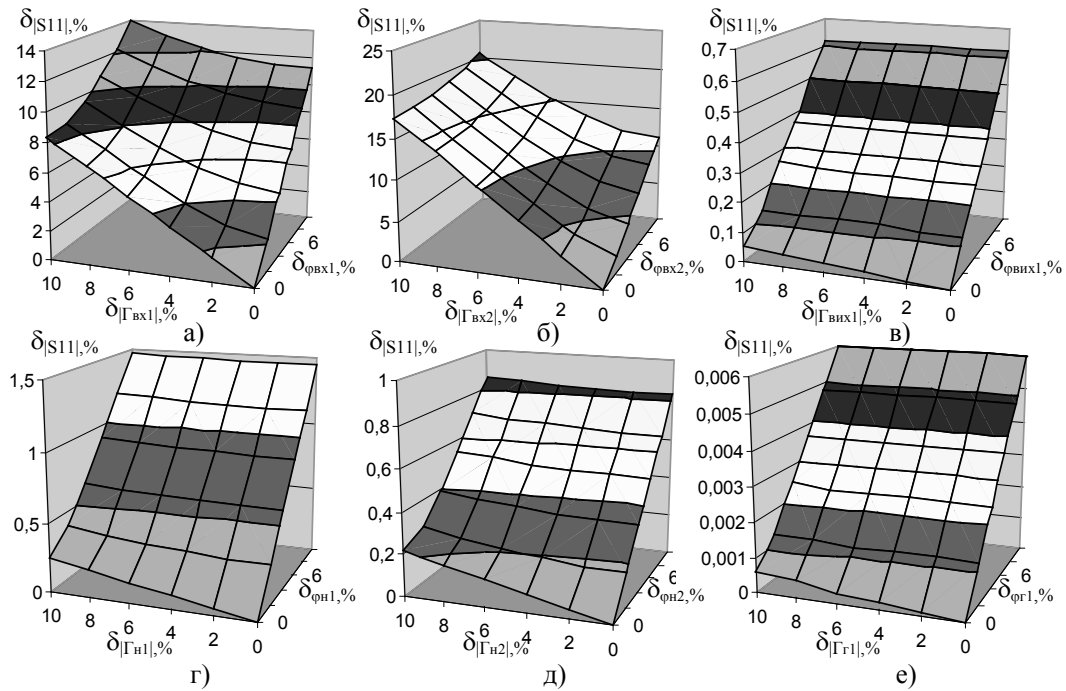


Рис. 1. Залежності відносної похибки визначення модуля $|S_{11}|$ від параметрів

$$\Gamma_{\text{вх}1}, \Gamma_{\text{вх}2}, \Gamma_{\text{вих}1}, \Gamma_{\text{н}1}, \Gamma_{\text{н}2}, \Gamma_{\text{г}1}$$

Виходячи з аналогічних міркувань отримано залежності відносної похибки визначення модуля $|S_{11}|$ від параметрів $\Gamma_{\text{вх}2}$, $\Gamma_{\text{вих}1}$, $\Gamma_{\text{н}1}$, $\Gamma_{\text{н}2}$, $\Gamma_{\text{г}1}$ (рис. 1б—е).

Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок, що на похибку визначення модуля $|S_{11}|$ не суттєво впливають похибки визначення навантажень. Максимальна загальна похибка у цьому випадку не перевищує 1,5 %, що зменшує вимоги до вибору самих навантажень. З графіків видно і те, що похибка визначення фази кожного із параметрів справляє значно більший вплив на похибку визначення модуля $|S_{11}|$, ніж похибки визначення модулів параметрів. Загалом, максимальна загальна похибка у найгіршому випадку не перевищує 20 %, що цілком задовільно для діапазону НВЧ.

Наступним етапом є оцінка похибки визначення фази $\varphi_{S_{11}}$ комплексного параметра S_{11} . Провівши аналогічні розрахунки і задавши граничне значення величини $\varphi_{S_{11}0} = 170\pi/180$, отримаємо залежності, показані на рис. 2.

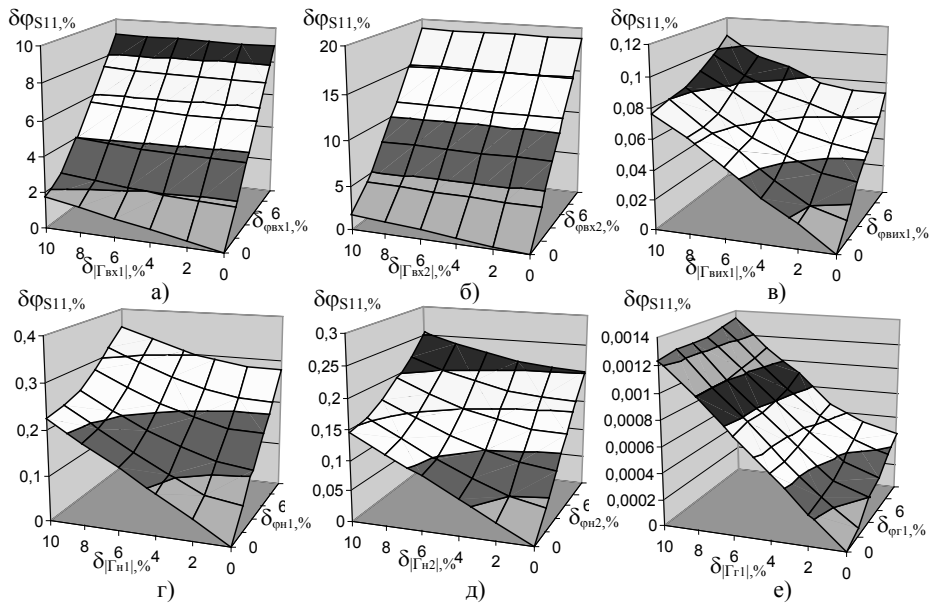


Рис. 2. Залежності відносної похибки визначення фази $\varphi_{S_{11}}$ від параметрів $\Gamma_{\text{вих1}}$, $\Gamma_{\text{вих2}}$, $\Gamma_{\text{вих1}}$, $\Gamma_{\text{н1}}$, $\Gamma_{\text{н2}}$, $\Gamma_{\text{г1}}$

Отримані результати аналогічні попереднім. Максимальна похибка, що вноситься в кінцевий результат навантаженнями, не перевищує 0,4 %. Визначення фази $\varphi_{S_{11}}$ також не залежить від коефіцієнта відбиття чотириполосника на виході $\Gamma_{\text{вих1}}$ (максимальна похибка в цьому випадку на рівні 0,1 %). Найбільше загальна похибка залежить від коефіцієнтів відбиття чотириполосника на вході $\Gamma_{\text{вих1}}$ і $\Gamma_{\text{вих2}}$, хоч і тут не перевищує 20 %.

З (3) визначимо модуль $|S_{22}|$ та фазу $\varphi_{S_{22}}$ комплексного параметра S_{22} , з (4) визначимо модуль $|S_{12}S_{21}|$ та фазу $\varphi_{S_{12}S_{21}}$ комплексного параметра $S_{12}S_{21}$ та оцінимо похибки їх визначення за методикою аналогічною до оцінки похибок визначення комплексного параметра S_{11} . Отримані результати показані на рис. 3—6.

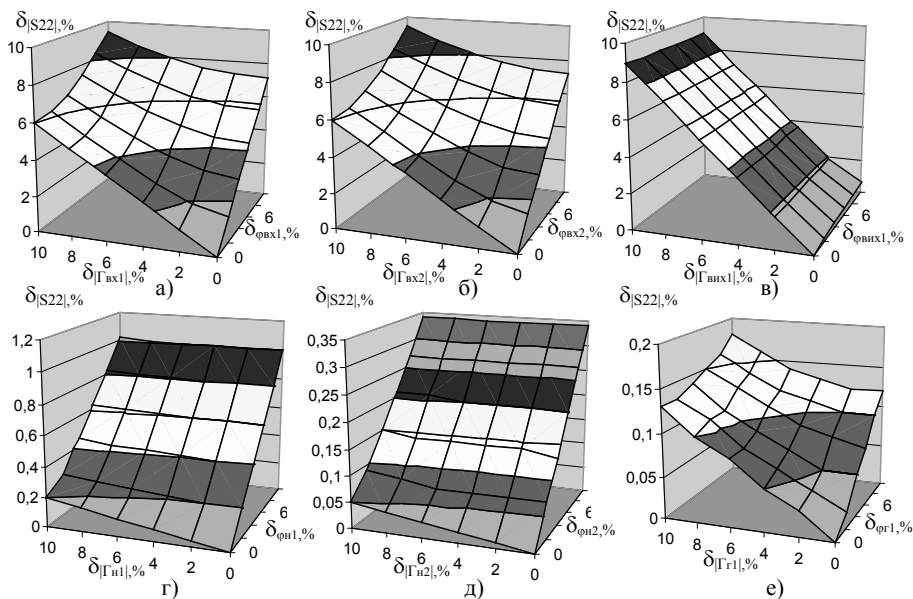


Рис. 3. Залежності відносної похибки визначення модуля $|S_{22}|$ від параметрів $\Gamma_{\text{вих1}}$, $\Gamma_{\text{вих2}}$, $\Gamma_{\text{вих1}}$, $\Gamma_{\text{н1}}$, $\Gamma_{\text{н2}}$, $\Gamma_{\text{г1}}$

Як видно з рисунку, максимальна відносна похибка визначення модуля $|S_{22}|$ не перевищує 10 % в залежності від параметрів $\Gamma_{\text{вх1}}$, $\Gamma_{\text{вх2}}$, $\Gamma_{\text{вих1}}$ і в межах 1 % для параметрів $\Gamma_{\text{н1}}$, $\Gamma_{\text{н2}}$, $\Gamma_{\text{г1}}$. Це вказує на високу точність визначення даного параметра для діапазону НВЧ.

Як і в попередньому випадку, спостерігаємо (див. рис. 4) значно більшу залежність сумарної похибки $\varphi_{S_{22}}$ від вхідних $\Gamma_{\text{вх1}}$, $\Gamma_{\text{вх2}}$ (не перевищує 5 %) та вихідного $\Gamma_{\text{вих1}}$ (не перевищує 10 %) коефіцієнтів відбиття, ніж від коефіцієнтів відбиття навантажень $\Gamma_{\text{н1}}$, $\Gamma_{\text{н2}}$ і генератора $\Gamma_{\text{г1}}$ (в обох випадках загальна похибка менше 1 %). Аналіз отриманих результатів також показує, що відносна похибка визначення фази $\varphi_{S_{22}}$ в основному визначається похибкою фази параметрів, а вплив похибки модуля кожного з параметрів не перевищує 1 %.

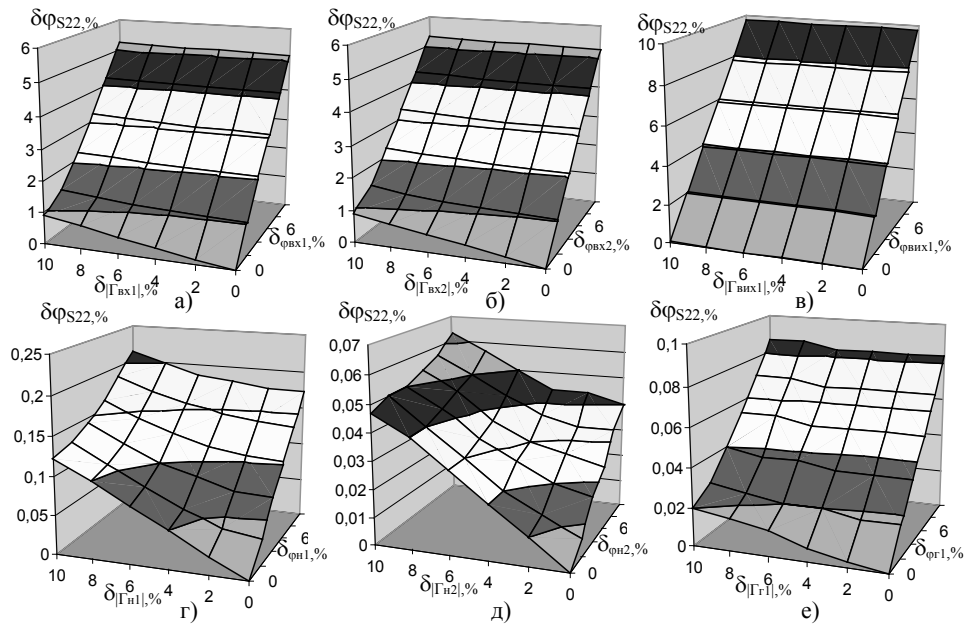


Рис. 4. Залежності відносної похибки визначення фази $\varphi_{S_{22}}$ від параметрів $\Gamma_{\text{вх1}}$, $\Gamma_{\text{вх2}}$, $\Gamma_{\text{вих1}}$, $\Gamma_{\text{н1}}$, $\Gamma_{\text{н2}}$, $\Gamma_{\text{г1}}$

Проаналізувавши отримані дані для визначення відносної похибки модуля $|S_{12}S_{21}|$ (рис. 5), бачимо, що максимальна похибка не перевищує 14 % в залежності від коефіцієнтів відбиття чотириполюсника на вході $\Gamma_{\text{вх1}}$, $\Gamma_{\text{вх2}}$, в інших випадках лежить в межах 1,5 %.

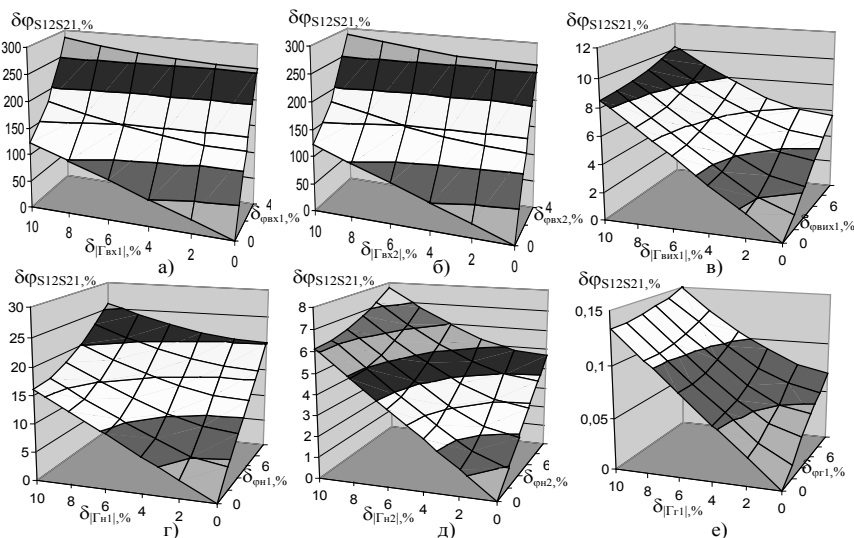
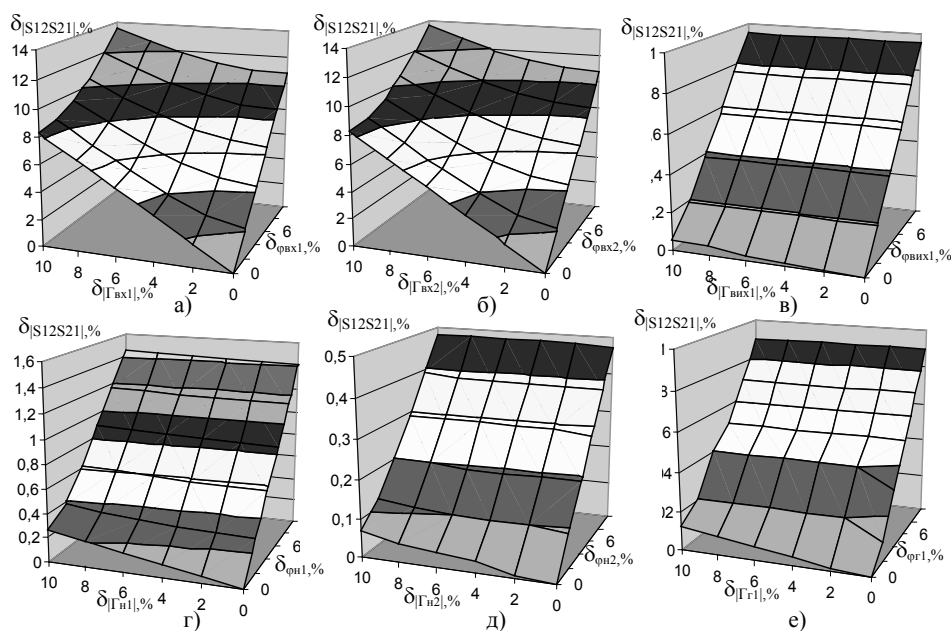


Рис. 5. Залежності відносної похибки визначення модуля $|S_{12}S_{21}|$ від параметрів $\Gamma_{\text{вх1}}$, $\Gamma_{\text{вх2}}$, $\Gamma_{\text{вих1}}$, $\Gamma_{\text{н1}}$, $\Gamma_{\text{н2}}$, $\Gamma_{\text{г1}}$

Рис. 6. Залежності відносної похибки визначення фази $\Phi_{S_{12}S_{21}}$ від параметрів

$$\Gamma_{вх1}, \Gamma_{вх2}, \Gamma_{вих1}, \Gamma_{пн1}, \Gamma_{пн2}, \Gamma_{г1}$$

Як видно з рис. 6, відносна похибка визначення фази $\Phi_{S_{12}S_{21}}$ дуже сильно залежить від похибки фази коефіцієнтів відбиття $\Gamma_{вх1}, \Gamma_{вх2}$ чотириполосника на вході і може призвести до неправильних розрахунків. Тому в цьому випадку вимірювання потрібно проводити з особливою точністю. Залежність загальної похибки від інших параметрів припустима для НВЧ діапазону (в залежності від $\Gamma_{пн1}$ не перевищує 25 %, для інших параметрів — не перевищує 10 %).

Висновки

Аналіз похибок опосередкованого способу визначення комплексних параметрів S_{11}, S_{22} і $S_{12}S_{21}$ показав:

1. Величина значення похибки вимірювання фази коефіцієнта відбиття має значніший вплив, на загальну похибку, ніж похибка вимірювання модуля цього параметра. Тому необхідно з особливою точністю проводити вимірювання фази кожного з параметрів.
2. Величина значення похибок під'єднаних навантажень майже не впливає на результат вимірювань (в основному не перевищує 1 %) і нею можна знехтувати. Це послаблює вимоги до вибору навантажень і спрощує процес вимірювань.
3. Значення похибок є задовільними для діапазону НВЧ (в основному не перевищують 20 %) і запропонований спосіб цілком можна використовувати для вимірювання параметрів S_{11}, S_{22} і $S_{12}S_{21}$ чотириполосників в діапазоні НВЧ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шварц Н. З. Линейные транзисторные усилители СВЧ. — М.: Сов. радио, 1980. — 368 с.
2. Бахтин Н. А., Шварц Н. З. Измерение S-параметров СВЧ транзисторов // Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Я. А. Федотова. — М.: Советское радио, 1970. — Вып. 23. — С. 276—284.
3. Филинук Н. А., Огородник К. В. Новые методы определения параметров активного четырехполосника // Тр. МНТК «Информационные и электронные технологии в дистанционном зондировании». — Баку (Азербайджан), — 2004. С. 418—421.
3. Богачев В. М., Никифоров В. В. Транзисторные усилители мощности. — М.: Энергия, 1978. — 344 с.
4. Новицкий П. В., Заграф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1985. — 246 с.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Надійшла до редакції 21.12.04.
Рекомендована до друку 28.02.05.

Філінюк Микола Антонович — завідувач кафедри, **Огородник Костянтин Володимирович** — аспірант.

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