

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.317.612

М. А. Філінюк, д. т. н., проф.;

К. В. Огородник, асп.;

О. О. Лазарєв, к. т. н.

СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ S-ПАРАМЕТРІВ ЧОТИРИПОЛЮСНИКА

Запропоновано новий спосіб вимірювання нестандартної системи S-параметрів чотириполюсника, що має меншу трудомісткість в порівнянні з класичними методами та може використовуватись в усьому діапазоні НВЧ. Наведено результати експериментальної перевірки запропонованого способу.

Постановка задачі

Для описання чотириполюсників у діапазоні НВЧ у даний час отримала широке застосування система S-параметрів (параметрів матриці розсіювання). Основною перевагою цих параметрів є те, що кожний з них має зрозумілий фізичний зміст.

Відомо, що підсилення НВЧ транзисторів падає з ростом частоти й у робочому діапазоні є невеликим. Тому вибір вхідних і вихідних навантажень, що забезпечують режим двостороннього узгодження з метою запобігання втрат «на відбиття», є важливим моментом для точного визначення S-параметрів чотириполюсника. Велика похибка відомих методів вимірювання стандартної системи S-параметрів [1, 2] пов'язана саме з неузгодженістю кінцевих навантажень, наявністю у вимірювальному тракті коаксіально-смушкових переходів та інших неоднорідностей, часто призводить до істотних помилок, і, як наслідок, до невірного розрахунку параметрів електронних схем.

В [3] запропонована система нестандартних S-параметрів чотириполюсника. Розрахунки з використанням нестандартних S-параметрів є точнішими, оскільки найважливіша інформація добувається безпосередньо з вимірювань коефіцієнтів відбиття, що виконуються з високою точністю. Але запропонований метод також має зазначені раніше недоліки, основним з яких варто вважати необхідність двостороннього узгодження кінцевих навантажень.

Виходячи з вищесказаного, у роботі вирішується задача підвищення точності і зниження трудомісткості вимірювання нестандартної системи S-параметрів чотириполюсника.

Теоретичне обґрунтування способу

На першому етапі розв'язується 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

$$\begin{cases} \Gamma_{\text{вх}1} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_{\text{н}1}}{1 - S_{22}\Gamma_{\text{н}1}}; \\ \Gamma_{\text{вх}2} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_{\text{н}2}}{1 - S_{22}\Gamma_{\text{н}2}}; \\ \Gamma_{\text{вих}1} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_{\text{г}1}}{1 - S_{11}\Gamma_{\text{г}1}}, \end{cases} \quad (1)$$

де: $\Gamma_{\text{н}1}$, $\Gamma_{\text{н}2}$, $\Gamma_{\text{г}1}$ — комплексні коефіцієнти відбиття фіксованих значень навантажень $Z_{\text{н}1}$, $Z_{\text{н}2}$ і

генератора $Z_{Г1}$; $\Gamma_{ВХ1}$, $\Gamma_{ВХ2}$ — значення комплексних коефіцієнтів відбиття по входу чотириполіусника зі значеннями $\Gamma_{Н1}$, $\Gamma_{Н2}$ комплексних коефіцієнтів відбиття навантажень, відповідно; $\Gamma_{ВІХ1}$ — значення комплексного коефіцієнта відбиття по виходу чотириполіусника зі значенням $\Gamma_{Г1}$ комплексного коефіцієнта відбиття генератора; S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{21} — параметри матриці розсіювання чотириполіусника.

Розв'язання системи (1) дозволяє отримати вирази для шуканої частини системи нестандартних S -параметрів:

$$S_{11} = \frac{\Gamma_{ВХ1} \Gamma_{Н2} (\Gamma_{Н1} \Gamma_{ВІХ1} - 1) + \Gamma_{ВХ2} (\Gamma_{ВХ1} \Gamma_{Н2} \Gamma_{Г1} - \Gamma_{Н1} (\Gamma_{ВХ1} \Gamma_{Г1} + \Gamma_{ВІХ1} \Gamma_{Н2} - 1))}{\Gamma_{Н1} - \Gamma_{Н2} + \Gamma_{ВХ2} \Gamma_{Н2} \Gamma_{Г1} - \Gamma_{ВХ1} \Gamma_{Н1} \Gamma_{Г1} + \Gamma_{Г1} (\Gamma_{ВХ1} - \Gamma_{ВХ2}) \Gamma_{Н1} \Gamma_{Н2} \Gamma_{ВІХ1}}; \quad (2)$$

$$S_{22} = \frac{(\Gamma_{Н2} - \Gamma_{Н1}) \Gamma_{ВІХ1} + \Gamma_{Г1} (\Gamma_{ВХ1} - \Gamma_{ВХ2} \Gamma_{ВІХ1} \Gamma_{Н2} + \Gamma_{ВХ2} (\Gamma_{ВІХ1} \Gamma_{Н1} - 1))}{\Gamma_{Н2} - \Gamma_{ВХ2} \Gamma_{Н2} \Gamma_{Г1} + \Gamma_{Н1} (\Gamma_{Г1} (\Gamma_{ВХ1} - \Gamma_{ВХ2} \Gamma_{ВІХ1} \Gamma_{Н2} + \Gamma_{ВХ2} \Gamma_{ВІХ1} \Gamma_{Н2}) - 1)}; \quad (3)$$

$$S_{12} S_{21} = \frac{(\Gamma_{ВХ1} - \Gamma_{ВХ2}) (\Gamma_{Н1} - \Gamma_{Н2}) (\Gamma_{ВХ1} \Gamma_{Г1} - 1) (\Gamma_{ВХ2} \Gamma_{Г1} - 1) (\Gamma_{ВІХ1} \Gamma_{Н1} - 1) (\Gamma_{ВІХ1} \Gamma_{Н2} - 1)}{(\Gamma_{Н2} - \Gamma_{ВХ2} \Gamma_{Н2} \Gamma_{Г1} + \Gamma_{Н1} (\Gamma_{Г1} (\Gamma_{ВХ1} - \Gamma_{ВХ2} \Gamma_{ВІХ1} \Gamma_{Н2} + \Gamma_{ВХ2} \Gamma_{ВІХ1} \Gamma_{Н2}) - 1))^2}. \quad (4)$$

На другому етапі, за допомогою параметра $S_{12} S_{21}$, знайденого з виразу (4), можна визначити значення параметра $|S_{12} S_{21}|$ за формулою

$$|S_{12} S_{21}| = \sqrt{\text{Re}^2(S_{12} S_{21}) + \text{Im}^2(S_{12} S_{21})}. \quad (5)$$

З огляду на те, що максимально-досяжний коефіцієнт підсилення чотириполіусника дорівнює [4]

$$K_{ms} = |S_{21} / S_{12}|, \quad (6)$$

розв'язуючи систему рівнянь (5)—(6), також знаходимо:

$$|S_{21}| = \sqrt{K_{ms} |S_{12} S_{21}|}; \quad (7)$$

$$|S_{12}| = \sqrt{|S_{12} S_{21}| / K_{ms}}. \quad (8)$$

Таким чином, як впливає з (2)—(4) і (7), (8), для знаходження нестандартної системи S -параметрів чотириполіусника S_{11} , S_{22} , $S_{12} S_{21}$, $|S_{12} S_{21}|$, $|S_{12}|$ і $|S_{21}|$ необхідно і достатньо зробити вимірювання двох значень його комплексного коефіцієнта відбиття по входу $\Gamma_{ВХ1}$ і $\Gamma_{ВХ2}$ з відомими значеннями комплексних коефіцієнтів відбиття навантаження, відповідно $\Gamma_{Н1}$ і $\Gamma_{Н2}$, одного значення комплексного коефіцієнта відбиття по виходу $\Gamma_{ВІХ1}$ з відомим комплексним коефіцієнтом відбиття генератора $\Gamma_{Г1}$ і максимального-досяжного коефіцієнта підсилення чотириполіусника K_{ms} . Трудомісткість цих вимірювань значно нижча, ніж з використанням відомих методів.

Важливою перевагою розглянутого способу вимірювання нестандартної системи S -параметрів чотириполіусника є відсутність необхідності двостороннього узгодження в процесі вимірювання комплексних коефіцієнтів відбиття, що значно знижує похибку визначення S -параметрів. Перевагою запропонованого способу є і те, що на величини $\Gamma_{Н}$ і $\Gamma_{Г}$ не накладаються ніякі обмеження, крім того, що вони повинні мати дійсну і уявну складові, що також веде до зменшення похибки вимірювань.

Експериментальна перевірка способу

Для реалізації запропонованого способу розроблена експериментальна установка, структурна

схема якої зображена на рис. 1. Більша частина блоків, що входять до установки, є стандартними. В якості ВККВ може бути використаний фазовий вольтметр, наприклад ФК2-12 або аналогічний. Для вимірювання потужності сигналу використовується термісторний міст МЗ-1. Комутатори К1—К8 можуть бути як механічними, так і електрично керованими. Вони практично не мають обмежень по фазочастотній характеристиці і швидкодії. Єдина вимога до них — низькі втрати в режимі комутації (менше 1 дБ).

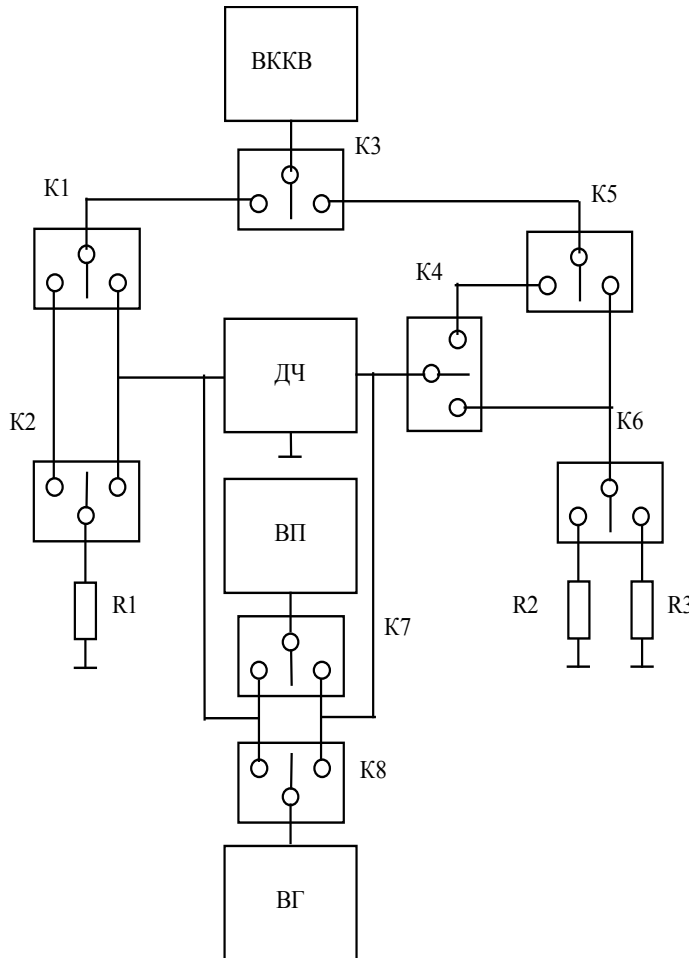


Рис. 1. Структурна схема вимірювальної установки для визначення нестандартної системи S-параметрів чотириполосника: ДЧ — досліджуваний чотириполосник; ВККВ — вимірювач комплексних коефіцієнтів відбиття; ВП — вимірювач потужності; ВГ — вимірювальний генератор; К1—К8 — комутатори

виходу $\Gamma_{\text{вих1}}$ при підключеному по входу чотириполосника резисторі R1. За результатами вимірювань з використанням (2)—(4) знаходимо S_{11} , S_{22} і $S_{12}S_{21}$.

Для визначення K_{ms} чотириполосника, використовуючи комутатори К7 і К8 з постійною потужністю ВГ, за допомогою ВП вимірюємо потужність сигналу, що проходить через чотириполосник у прямому P_{21} і зворотному P_{12} напрямках. Використовуючи відоме співвідношення [5] $K_{ms} = \sqrt{P_{21}/P_{12}}$ і вирази (7) і (8), визначаємо значення $|S_{12}|$ і $|S_{21}|$.

Для експериментальної перевірки розглянутого способу виконані вимірювання системи нестандартних S-параметрів чотириполосника, реалізованого на біполярному транзисторі типу КТ391, включеного за схемою з загальною базою, робоча точка якого вибиралася в активній області вихідної ВАХ ($I_K = 5$ мА, $U_{K6} = 5$ В). Результати досліджень проілюстровані на рис. 2, у порівнянні з аналогічними характеристиками, отриманими за допомогою відомого методу [3], показали їх ідентичний характер.

Оцінка методичних похибок цих вимірювань в зв'язку з їх громіздкістю буде розглянута в окремій роботі

резимі комутації (менше 1 дБ). Резистори R1—R3 виконують роль комплексних імітансів W_{n1} , W_{n2} і W_{r1} , кожному з яких відповідає комплексний коефіцієнт відбиття Γ_{n1} , Γ_{n2} і Γ_{r1} . Це можуть бути і низько-частотні резистори, але значення уявної і дійсної складових їхніх коефіцієнтів відбиття повинні у всьому частотному діапазоні вимірювань відрізнятися не менше, ніж у 2—3 рази.

Процес вимірювання полягає в тому, що у заданій точці частотного діапазону, в нейтральних положеннях комутаторів К4, К7 і К8, за допомогою комутаторів К1, К2, К3, К5 і К6 виконується вимірювання комплексних коефіцієнтів відбиття Γ_{n1} , Γ_{n2} і Γ_{r1} резисторів R1—R3. Потім ВККВ послідовно підключається до входу чотириполосника при підключених на його виході резисторах R2 та R3 і виконуються вимірювання значень комплексних коефіцієнтів відбиття по входу чотириполосника $\Gamma_{\text{вх1}}$ і $\Gamma_{\text{вх2}}$. На наступному етапі аналогічним чином вимірюється комплексний коефіцієнт відбиття по

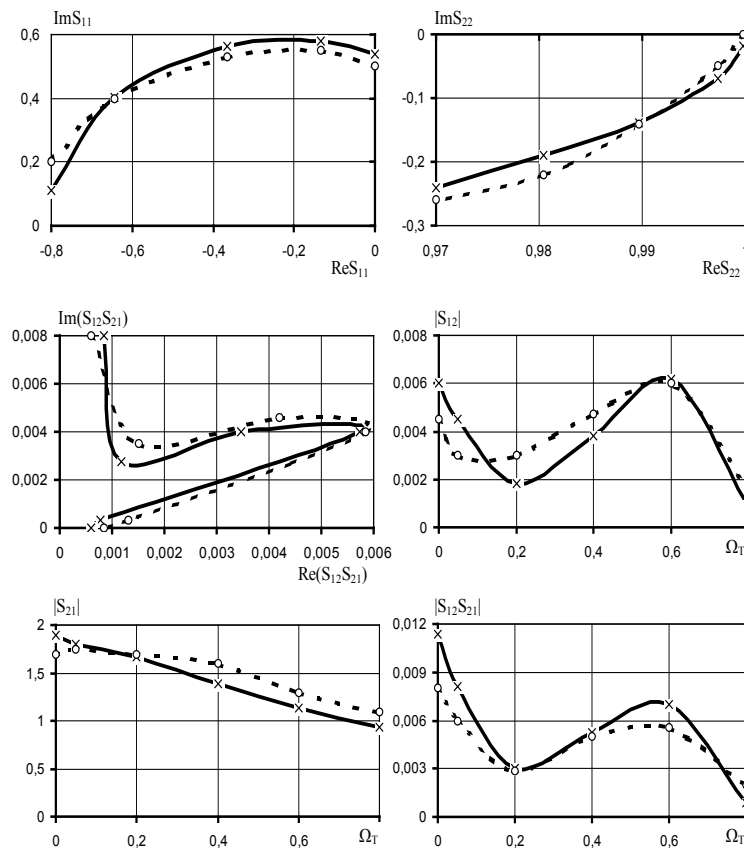


Рис. 2. Результати експериментальних досліджень S-параметрів нестандартної системи чотириполюсника на базі біполярного транзистора КТ391, отримані з використанням розробленої установки (-----) та з використанням відомого методу (-.-.-), описаного в [3]

Висновки

Розроблений спосіб вимірювання забезпечує визначення системи нестандартних S-параметрів чотириполюсника, придатний для використання в усьому діапазоні НВЧ і має такі основні переваги в порівнянні з відомими методами:

— відсутність необхідності двостороннього узгодження в процесі вимірювання комплексних коефіцієнтів відбиття, що знижує похибку визначення S-параметрів;

— відсутність жорстких обмежень на значення імітансів навантажень W_H і W_Γ , що дозволяє, за відповідної доробки й використання ПЕВМ, реалізувати панорамний вимірювач нестандартних S-параметрів чотириполюсника 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. Шварц Н. З. Система нестандартных S-параметров // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы, под ред. А. А. Васенкова и Я. А. Федотова. — М.: Советское радио, 1976. — Вып. 1. — С. 302—310.
4. Богачев В. М., Никифоров В. В. Транзисторные усилители мощности. — М.: Энергия, 1978. — 344 с.
5. Филинук Н. А., Песков С. Н., Павлов С. Н. Определение параметров физической эквивалентной схемы ВЧ транзисторов // Известия вузов МВ и ССО СССР. — К.: Радиоэлектроника, 1982. — Т. 25. — № 12. — С. 38—43.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Надійшла до редакції 7.10.04
Рекомендована до друку 10.11.04

Філінюк Микола Антонович — завідувач кафедри; **Огородник Костянтин Володимирович** — аспірант; **Лазарев Олександр Олександрович** — старший викладач.

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