

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД «ПЛАВАЮЧОГО НАВАНТАЖЕННЯ» ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМІТАНСНОЇ МАТРИЦІ ЧОТИРИПОЛЮСНИКА

О. Ліщинська Л.Б., 2011

Вінницький національний технічний університет

Розроблено удосконалений метод “плаваючого навантаження” вимірювання параметрів імітансної матриці чотириполюсника, що забезпечує підвищення точності вимірювань та стійкості вимірювальної установки під час вимірювання імітансних параметрів потенційно нестійких чотириполюсників.

Разработан усовершенствованный метод “плавающей нагрузки” измерения параметров имитансной матрицы четырехполюсника, что обеспечивает повышение точности измерений и стойкости измерительной установки при измерении имитансных параметров потенциально неустойчивых четырехполюсников.

The improved method of the floating loading of measuring of parameters of immittance matrix of quadripole which provides the increase of exactness of measurements and firmness of the measuring setting at measuring of immittance parameters potentially unsteady quadripoles is developed.

Вступ. Імітансні W -параметри широко застосовують на високих частотах у вигляді Y -параметрів, вимірюваних у режимі короткого замикання (КЗ), і Z -параметрів, вимірюваних у режимі холостого ходу (ХХ). Зі зростанням частоти забезпечення цього режиму ускладнюється, що призводить до зростання похибки вимірювань, і тому для частот понад 1 ГГц відсутня стандартна апаратура і їх вимірювання не проводять. Більшість розробників використовують S -параметри, вимірювані у режимі узгодження за постійного стандартного (зазвичай 50 або 75 Ом) опору хвильового тракту. Але внаслідок потенційної нестійкості активних приладів у діапазонах УВЧ і НВЧ використання цих параметрів також обмежене. Здебільшого використовують так звані нестандартні системи S -параметрів, що не володіють повнотою, але є достатніми для виконання визначеного кола завдань [1].

Аналіз попередніх досліджень. Як показано в роботі [2], загальним недоліком стандартних методів вимірювання W (Y , Z)- і S - параметрів є необхідність дотримання у процесі вимірювання умови постійності імітансів навантаження ($W_H = 0$; $W_H = Z_0$; $W_H = \infty$) і генератора ($W_G = 0$; $W_G = Z_0$; $W_G = \infty$). Це технічно неможливо здійснити у широкому діапазоні частоти, може призвести до неконтрольованого самозбудження експериментальної установки, а отже – до зростання похибки вимірювання.

Одним зі способів подолання цих недоліків є використання запропонованої у [3] нестандартної системи імітансних параметрів чотириполюсника. Вона об'єднує: W_{11} ; W_{22} ; $\text{Re}(W_{12}W_{21})$; $\text{Im}(W_{12}W_{21})$; $|W_{12}W_{21}|$; $|W_{12}|$; $|W_{21}|$. Параметрів цієї системи достатньо для розрахунку більшості аналогових інформаційних пристроїв на базі активних чотириполюсників.

Щоб уможливити знаходження цих параметрів у широкому діапазоні частот з достатньою точністю, у [4] запропоновано метод їх вимірювання, що не вимагає виконання умов: $W_H - const$, $W_G - const$. Він отримав назву «методу плаваючого навантаження». Суть цього методу полягає у вимірюванні трьох або більше значень вхідного ($W_{ex.1}$, $W_{ex.2}$, $W_{ex.3} \dots$) і вихідного ($W_{вих.1}$, $W_{вих.2}$, $W_{вих.3} \dots$) імітансів чотириполюсника за довільних суто реактивних імітансів навантаження $\text{Im} W_H$ ($\text{Re} W_H = 0$) – var і генератора - $\text{Im} W_G$ ($\text{Re} W_G = 0$), а також трьох значень вхідного W_{ex} (можливо, і вихідного) імітансу чотириполюсника за довільних реактивних імітансів навантаження (генератора) з фіксованими втратами $\text{Re} W_H - const$.

Враховуючи, що на комплексній площині залежність вхідного W_{ex} (вихідного $W_{вих}$) імітансу лінійного чотириполюсника (або квазілінійного, яким є

активний чотириполосник у режимі малого сигналу) від зміни реактивного імітансу навантаження $\text{Im}W_H$ (генератора $\text{Im}W_G$) являє собою коло [5], за результатами вимірювання вхідного W_{ex} і вихідного W_{vix} імітансів знаходять координати центра $(W_{ex.0}, W_{vix.0})$ і радіуси цих імітансних кіл: $(r_{ex}, r'_{ex}, r_{vix})$. За їх значеннями розраховують імітансні параметри нестандартної системи параметрів чотириполосника [2]: $\text{Re}W_{22}$, $|W_{12}W_{21}|$, $\text{Re}W_{11}$, $\text{Re}(W_{12}W_{21})$, $\text{Im}(W_{12}W_{21})$, $\text{Im}W_{11}$, $\text{Im}W_{22}$.

Розширення нестандартної системи W -параметрів чотириполосника досягається вимірюванням коефіцієнта передачі чотириполосника на межі його стійкості K_{ms} [5], що дає змогу визначити:

$$|W_{12}| = \sqrt{K_{ms} |W_{12}W_{21}|} \quad \text{та} \quad |W_{21}| = \sqrt{|W_{12}W_{21}| / K_{ms}}.$$

Перевагою методу є можливість застосування для вимірювання параметрів активних чотириполосників як на високих, так і на надвисоких частотах. Він придатний також для реалізації панорамних вимірювань.

Аналіз методу показав, що основна похибка непрямого вимірювання цієї нестандартної системи W -параметрів чотириполосника полягає у похибці вимірювання вхідного імітансу W_{ex} (вихідного W_{vix}) і в необхідності забезпечення умови $\text{Re}W_H (\text{Re}W_G) = 0$, що практично не реалізується у разі використання пасивних навантажень. Задовільний результат досягається при використанні високочастотних ($Q_0 \geq 100$) реактивних навантажень. Такі навантаження пропонується забезпечити високочастотними змінними конденсаторами або короткозамикаючими поршнями. Добротність таких компонентів на частотах вище за $f > 1 \text{ ГГц}$ менша від 100 одиниць і зменшується зі збільшенням частоти, що призводить до зростання похибки вимірювань. Крім того, використання високочастотних навантажень сприяє самозбудженню вимірювальної установки при потраплянні в область імітансного кола, де $\text{Re}W_{ex} (\text{Re}W_{vix}) < 0$.

Мета роботи

1. Підвищення точності вимірювань нестандартної системи імітансних параметрів чотириполосника.

2. Забезпечення стійкості вимірювальної установки під час вимірювання імітансних параметрів потенційно нестійких чотириполосників.

Теоретичне обґрунтування методу. Використовуючи відомий вираз для вихідного імітансу лінійного чотириполосника у вигляді [2]:

$$W_{vix} = \text{Re}W_{vix} + j \text{Im}W_{vix} = \text{Re}W_{22} + j \text{Im}W_{22} - \frac{m_1 + jm_2}{\text{Re}(W_G + W_{11}) + j \text{Im}(W_G + W_{11})}, \quad (1)$$

де $m_1 = \text{Re}(W_{12}W_{21})$; $m_2 = \text{Im}(W_{12}W_{21})$, прирівнюючи дійсні і уявні складові обох частин рівняння (1) і виключаючи дійсний імітанс генератора $\text{Re}W_G$, отримуємо співвідношення

$$\left[\text{Re}(W_{vix} - W_{22}) + \frac{m_2}{2 \text{Im}(W_G + W_{11})} \right]^2 + \left[\text{Im}(W_{vix} - W_{22}) - \frac{m_1}{2 \text{Im}(W_G + W_{11})} \right]^2 = (m_1^2 + m_2^2) / 4 \text{Im}^2(W_G + W_{11}). \quad (2)$$

Аналіз (2) показує, що на імітансній площині W_{vix} за різних значень уявної складової імітансу навантаження $\text{Im}W_H$ являє собою множину кіл (рис. 1) з координатами центра:

$$\text{Re}W_{vix.0} = \text{Re}W_{22} - \frac{m_2}{2 \text{Im}(W_G + W_{11})}; \quad (3)$$

$$\text{Im}W_{vix.0} = \text{Im}W_{22} + \frac{m_1}{2 \text{Im}(W_G + W_{11})} \quad (4)$$

і радіусами

$$r_{vix} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} / 2 \text{Im}(W_G + W_{11}). \quad (5)$$

Всі кола проходять через точку $(\text{Re}W_{22}, j \text{Im}W_{22})$. Центри цих кіл лежать на прямій з кутовим коефіцієнтом $\Psi_W = \arctg(m_1/m_2)$.

Ці кола виявляються ортогональними імітансним колам при $\text{Im}W_H = \text{var}$, використовуваним у методі плаваючого навантаження [4].

Виконавши аналогічні перетворення для W_{ex} , знаходимо:

$$\text{Re}W_{ex.0} = \text{Re}W_{11} - \frac{m_2}{2 \text{Im}(W_H + W_{22})}; \quad (6)$$

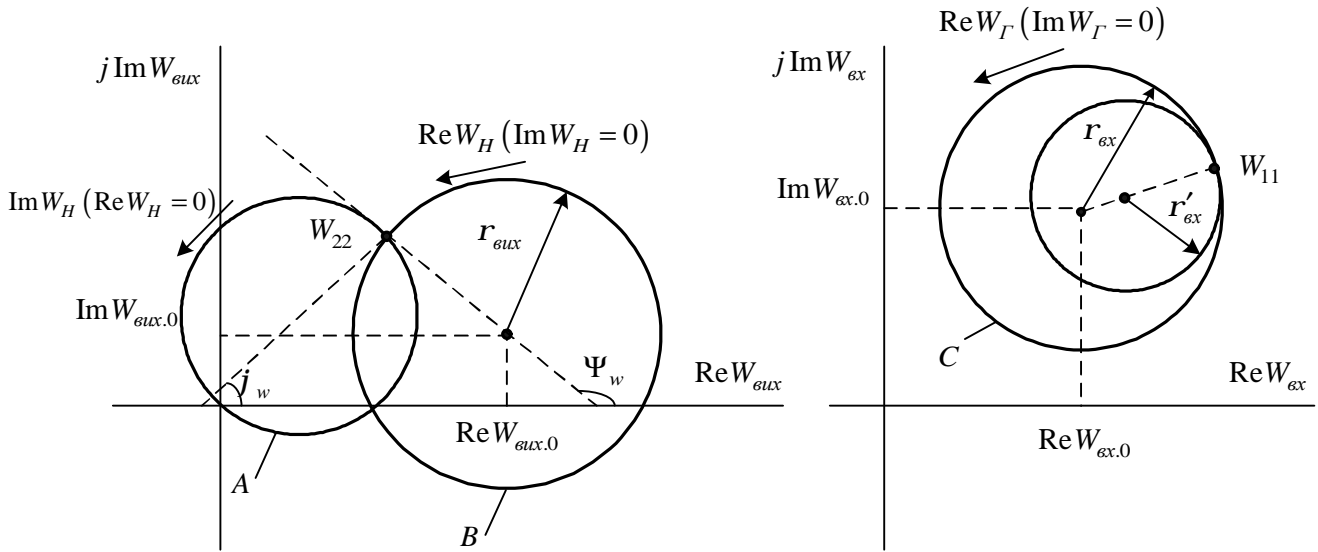


Рис. 1. Імітансні кола лінійного чотириполюсника при зміні:
 $\text{Im}W_H (\text{Re}W_H = 0) - A$; $\text{Re}W_H (\text{Im}W_H = 0) - B$; $\text{Re}W_\Gamma (\text{Im}W_\Gamma = 0) - C$

$$\text{Im}W_{ex.0} = \text{Im}W_{11} + \frac{m_1}{2 \text{Im}(W_H + W_{22})}; \quad (7)$$

$$r_{ex} = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} / 2 \text{Im}(W_H + W_{22}). \quad (8)$$

Максимальні радіуси мають вхідні та вихідні імітансні кола, якщо $\text{Im}W_H = 0$, $\text{Im}W_\Gamma = 0$.

За аналогією з методом плаваючого навантаження, розв'язуючи (3–8), знаходимо систему нестандартних імітансних параметрів чотириполюсника:

$$\text{Im}W_{22} = r'_{ex} \text{Im}W_H / (r_{ex} - r'_{ex});$$

$$|W_{12}W_{21}| = 2r_{ex} \text{Im}W_{22};$$

$$\text{Im}W_{11} = |W_{12}W_{21}| / 2r_{ex};$$

$$\text{Re}(W_{12}W_{21}) = 2 \text{Im}W_{22} (\text{Im}W_{ex.0} - \text{Im}W_{11});$$

$$\text{Im}(W_{12}W_{21}) = \sqrt{|W_{12}W_{21}|^2 - \text{Re}^2(W_{12}W_{21})};$$

$$\text{Re}W_{11} = \text{Re}W_{ex.0} + \text{Im}(W_{12}W_{21}) / 2 \text{Im}W_{22};$$

$$\text{Re}W_{22} = \text{Re}W_{ex.0} + \text{Im}(W_{12}W_{21}) / 2 \text{Im}W_{11}.$$

Отже, виконуючи подібні вимірювання, як і у методі плаваючого навантаження, отримуємо шукану систему параметрів чотириполюсника.

Відмінність запропонованого методу полягає у тому, що як плаваюче навантаження використовується не реактивний, а активний імітанс

$\text{Re}W_H (\text{Re}W_\Gamma) - \text{var}$. У реальності не існує суто активного імітансу. Його можна отримати, наприклад, створивши резонансний режим. Але під час практичних вимірювань, з метою зменшення похибки вимірів, достатньо, щоб добротність такого елемента була $Q_R \leq 10^{-2}$. Технічно це нескладно, наприклад, при використанні як навантаження *p-i-n* діода, що полегшує процес автоматизації вимірювань. Не накладається також ніяких обмежень на реактивність $\text{Im}W_H$ (або $\text{Im}W_\Gamma$) при знаходженні радіуса r'_{ex} .

Наступною перевагою запропонованого методу є можливість абсолютного усунення самозбудження вимірювальної установки, оскільки під'єднання на вході або виході дійсного імітансу призводить до збільшення інваріантного коефіцієнта стійкості навантаженого чотириполюсника [6]

$$K_y = \frac{2 \text{Re}(W_{11} + W_\Gamma) \text{Re}W_{22} - \text{Re}(W_{12}W_{21})}{|W_{12}W_{21}|}.$$

Порівняно з відомим методом плаваючого навантаження запас стійкості у запропонованому методі збільшується в $(1 + 2 \text{Re}W_\Gamma \text{Re}W_{22} / K_y |W_{12}W_{21}|)$ разів.

Експериментальна перевірка методу. Експериментальна перевірка методу полягала у частотних

вимірюваннях нестандартної системи параметрів матриці провідності чотириполосника, що реалізується на базі польового транзистора типу 3П321.

Виміри проводилися з використанням стандартної вимірювальної апаратури на базі коаксіальної вимірювальної лінії P1–18. Як активне навантаження використовувався *p-i-n* діод типу А517. Нестандартним

вузлом вимірювальної установки є електрична схема увімкнення транзистора у вимірювальний тракт і подавання на нього напруги живлення (рис. 2). Вона дає змогу шляхом комутації реалізувати різні схеми увімкнення транзистора як чотириполосника, а також змінювати як величину, так і полярність напруги на затворі.

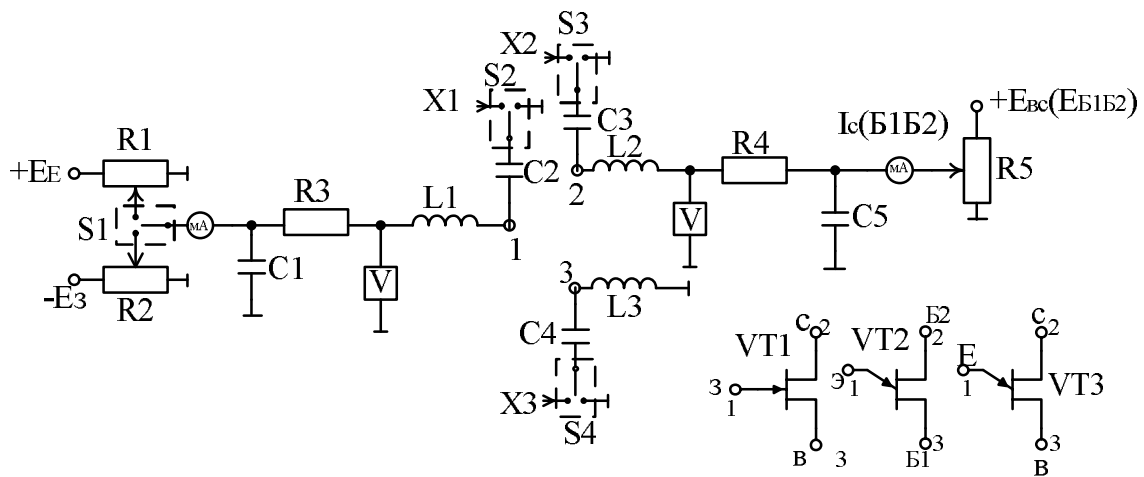


Рис. 2. Універсальна електрична схема подавання живлення і сигналу на ПТ (VT1), ОТ (VT2) та ППТ (VT3)

Результати експериментальних досліджень Y_{11} і Y_{22} транзистора, увімкненого за схемою зі спільним виток, порівнювали з розрахунковими значеннями цих параметрів, отриманих з використанням фізичної моделі Шихмана–Ходжеса на підставі параметрів цього транзистора, наведених в [7].

У всьому діапазоні вимірювань (0,1–3 ГГц) відмінність розрахункових і експериментальних значень цих параметрів не перевищувала 20 %. Враховуючи, що розрахункові параметри фізичної моделі транзистора є статистично усередненими, а вимірювання виконували на реальному транзисторі, отриману відмінність можна вважати задовільною.

Висновки

1. Метод плаваючого навантаження уможливує вимірювання системи нестандартних *W*-параметрів у широкому діапазоні частот, до яких належать УВЧ і НВЧ діапазони, оскільки він не вимагає виконання жорстких обмежень на величину навантаження. 2. Недоліком відомого методу плаваючого навантаження

є: по-перше, збільшення похибки вимірювань при використанні низькодобротних реактивних навантажень; по-друге, можливість неконтрольованого самозбудження експериментальної установки під час дослідження потенційно нестійких чотириполосників. 3. Підвищення точності методу плаваючого навантаження досягається використанням, замість високодобротного реактивного навантаження, низькодобротного активного навантаження. Це забезпечує абсолютну стійкість вимірювальної установки у разі вимірювання параметрів потенційно нестійких чотириполосників.

1. Шварц Н.З. Система нестандартных *S*-параметров / Н.З. Шварц // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы – М.: Сов. радио, 1976. – Вып. 1. – С. 302–310. 2. Філінюк М.А. Метрологічні основи негatronіки: моногр. / М.А. Філінюк, Д.В.Гаврілов. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2006. – 188 с. – ISBN 966-641-168-73. 3. А.с. 1141346 СССР. Устройство для измерения полных сопротивлений многополюсников /

Филинчук Н.А. – Заявл. 25.05.82; Опубл. 23.02.85, Бюл. № 7. – 6 с. 4. Филинчук Н.А. Определение параметров математических моделей информационных устройств на основе негatronов // Негatronика / Под ред. Л.Н. Степановой. – Новосибирск: Наука, 1995. – 315 с. 5. Філінчук М. А. Методи та засоби вимірювання параметрів потенційно-нестійких чотири полюсників : моногр. / М. А. Філінчук, К. В. Огородник, Л. Б. Ліщинська. - Вінниця : ВНТУ, 2010. - 176 с. -

ISBN 978-966-641-342-3 6. Філінчук М. А. Основи негatronіки. Т. II. Прикладні аспекти негatronіки: моногр. / М.А. Філінчук – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 306 с. - ISBN 966-641-203-9 7. Разевиг В.Д. Применение программ P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Вып. 2: Модели компонентов аналоговых устройств / В.Д.Разевиг. - М.: Радио и связь, 1992. - 64с. - ISBN 5-256-01090-5