

УДК 62.98

<sup>1</sup>О. М. Васілевський, к.т.н., доц., <sup>2</sup>О. М. Возняк, к.т.н., доц.,  
<sup>3</sup>В. К. Тихонов, доц., <sup>4</sup>І. А. Дудатьєв, асистент, <sup>5</sup>Д. В. Мостовий, студент**ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПЕРЕДАЧІ ЧОТИРИПОЛЮСНИКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ РІЗНИЦЕВОГО МЕТОДУ**Вінницький національно технічний університет,  
e-mail: <sup>1</sup>wasilevskiy@mail.ru, <sup>2</sup>voznayakaleksandr@mail.ru, <sup>4</sup>dudatiev@mail.ru, <sup>5</sup>trekdemon1993@mail.ru*Здійснено аналіз методів вимірювання параметрів чотириполосників на основі якого запропоновано новий спосіб вимірювання цих параметрів з підвищеною точністю.***Ключові слова:** чотириполосник, аналіз, вимірювання, точність, різницевий метод.

**Актуальність.** При описі чотириполосника з погляду енергетичних властивостей звичайно використовують дві характеристики підсилення потужності - робочий  $K_p$  і номінальний  $K_{pH}$  коефіцієнти підсилення (передачі) потужності [1].

Робочий коефіцієнт підсилення потужності дорівнює відношенню потужності  $P_n$ , що виділяється в дійсній складовій імітанса навантаження  $W_n$ , до потужності  $P_{vx}$ , яка підводиться до входу чотириполосника.

Загальним недоліком відомих способів є можливість появи неконтрольованих збуджень експериментальної установки при вимірюванні параметрів чотириполосника внаслідок наявності зворотних зв'язків і підсилювальних властивостей ( $y_{21} \neq 0$ ,  $y_{12} \neq 0$ ). Все це вносить додаткові похибки в результат вимірювання. Найбільше наочно це видно при вимірюваннях у діапазоні частот, де запас стійкості  $K_{vh} < 1$  [2]. Тому, стоїть задача, підвищити точність визначення параметрів потенційно нестійких чотириполосників і забезпечити стійкість роботи вимірювальної установки.

**Аналіз стану досліджень.** Номінальний коефіцієнт підсилення потужності дорівнює відношенню потужності  $P_n$ , що виділяється в дійсній складовій імітанса навантаження, до номінальної потужності генератора  $P_{гн}$ , що дорівнює потужності, яка віддається генератором в узгоджене навантаження (вхідний імітанс активного чотириполосника)

$$P_{гн} = \frac{I_g^2}{8 \operatorname{Re} W_2}, \quad (1)$$

де  $I_g$  - амплітуда струму;

$W_g$  - імітанс генератора.

Величини  $K_p$  і  $K_{pH}$  - інваріантні, їхні чисельні значення не залежать від вибору системи параметрів чотириполосника, тому можна їх записати в узагальнених  $W$ -параметрах:

$$K_p = \frac{P_n}{P_{vx}} = \frac{|W_{21}|^2 \operatorname{Re} W_n}{|W_{22} + W_n|^2 \operatorname{Re} W_{vx}}, \quad (2)$$

$$K_{pH} = \frac{4|W_{21}|^2 \operatorname{Re} W_2 \operatorname{Re} W_n}{\left| (W_{11} + W_2)(W_{22} + W_n) - W_{12} W_{21} \right|^2} = \frac{P_n}{P_{гн}}. \quad (3)$$

З формули (2) випливає, що робочий коефіцієнт підсилення потужності  $K_p$  є функцією  $\operatorname{Re} W_n$  і  $\operatorname{Im} W_n$ . Продиференціювавши вираз (3) за умови

$$\frac{\partial K_p}{\partial \operatorname{Re} W_n} = 0, \quad \frac{\partial K_p}{\partial \operatorname{Im} W_n} = 0, \quad (4)$$

знайдемо значення  $\operatorname{Re} W'_n$  та  $\operatorname{Im} W'_n$ , при яких  $K_p$  максимальний:

$$\operatorname{Re} W'_n = \frac{|W_{12} W_{21}| \sqrt{K_{с.вн}^2 - 1}}{2 \operatorname{Re} W_{11}}, \quad (5)$$

$$\operatorname{Im} W'_n = \frac{\operatorname{Im}(W_{12} W_{21})}{(2 \operatorname{Re} W_{11})} - \operatorname{Im} W_{22}. \quad (6)$$

Підставивши вирази (5) і (6) у (2), одержимо вираз для максимального коефіцієнта підсилення потужності:

$$K_{pm} = \frac{\left| \frac{W_{21}}{W_{12}} \right|}{\left( \sqrt{K_{с.вн}^2 - 1} + K_{с.вн} \right)}. \quad (7)$$

Як видно з (7),  $K_{pm}$  може бути реалізований при  $K_{с.вн} \geq 1$ . Звідси випливає, що максимально досяжний коефіцієнт стійкого підсилення (при  $K_{с.вн}=1$ ) дорівнює

$$K_{mS} = \left| \frac{W_{21}}{W_{12}} \right|. \quad (8)$$

Максимально досяжний коефіцієнт стійкого підсилення (передачі) на межі стійкості чотириполосника  $K_{mS}$  характеризує його потенційні підсилювальні можливості, визначає величини номінального коефіцієнта передачі  $K_{pn}$  і коефіцієнта невзаємності [3]  $K_n = K_{mS}^2$  в області стійкості.

Відомий спосіб визначення цього коефіцієнта за результатами вимірювання параметрів провідності прямої  $y_{21}$  і зворотної  $y_{21}$  передачі чотириполосника

$$K_{mS} = \left| \frac{Y_{21}}{Y_{12}} \right|. \quad (9)$$

Інший спосіб базується на вимірюванні потужностей  $P_1$  і  $P_2$  сигналу, які виділяються в дійсну складову провідності навантаження за умови постійної потужності сигналу генератора і рівності опор генератора опорів навантаження [4]:

$$K_{mS} = \sqrt{\frac{P_1}{P_2}}. \quad (10)$$

Недоліком першого способу є його низька точність у діапазоні високих частот, пов'язана з великою похибкою вимірювання  $y$ -параметрів транзисторів. Наприклад, при використанні приладу Л2-8 на частоті 60 МГц ця похибка складає 20%.

**Мета досліджень.** Підвищити точність визначення параметрів потенційно нестійких чотириполос-

сників і забезпечити стійкість роботи вимірювальної установки.

**Викладання основного матеріалу.** Для вирішення цієї мети пропонується використовувати вимірювальну установку, структурна схема якої подана на рисунку 1. Відомо, що якщо підключити між спільною шиною чотириполосника і спільною шиною вимірювальної установки повний опір  $Z$ , у-параметри (W-параметри в загальному випадку) наново отриманого чотириполосника приймуть вигляд [5 - 8]:

$$\begin{aligned} Y_{12} &= \frac{(y_{12} - Z\Delta y)}{(1 + Z\Sigma y)}; \\ Y_{21} &= \frac{(y_{21} - Z\Delta y)}{(1 + Z\Sigma y)}, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $\Delta y = y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}$ ,

$\Sigma y = y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22}$ .

Підберемо такий повний опір  $Z$ , що дозволить компенсувати деякі параметри. Нехай  $Z_1$  буде рівний

$$Z_1 = \frac{y_{21}}{\Delta y}. \quad (12)$$

Тоді, підставивши (12) у вираз (11), одержимо, що  $Y_{21} = 0$ . Це відповідає нульовому значенню коефіцієнта прямої передачі чотириполосника по потужності.

У випадку зміни повного опору  $Z$  до величини

$$Z_2 = \frac{y_{12}}{\Delta y} \quad (13)$$

провідність  $Y_{12} = 0$ . Це відповідає нульовому значенню коефіцієнта зворотної передачі знов утвореного чотириполосника по потужності [6].

Візьмемо відношення (12) до (13) і, співставивши з (9), одержимо:

$$\left| \frac{Z_1}{Z_2} \right| = \left| \frac{y_{21}}{y_{12}} \right| = K_{mS}. \quad (14)$$

З цього виразу очевидно, що шляхом вимірювання відношення значень повних опорів  $Z_1$  і  $Z_2$  у колі спільного виводу чотириполосника, які забезпечують нейтралізацію, відповідно, коефіцієнтів зворотної і прямої передачі вимірювального кола, можливе визначення максимально досяжного коефіцієнта  $K_{mS}$  передачі на межі стійкості чотириполосника ( $K_{c,вн} = 1$ ).

На основі вищевказаних виразів видно перевагу запропонованого способу визначення максимально досяжного коефіцієнта підсилення (передачі)  $K_{ms}$ . Відсутня передача потужності сигналу при вимірюванні через досліджуваний чотириполосник від генератора в індикатор ( $Y_{12} = 0$ ,  $Y_{21} = 0$ ), що не призводить до самозбудження вимірювальної установки в результаті впливу внутрішнього зворотного зв'язку чотириполосника, чим забезпечується стійкість вимірювальної установки (теоретичне значення інваріантного коефіцієнта стійкості  $K_c \rightarrow \infty$ ), що підвищує точність вимірювання за рахунок неможливості неконтрольованого самозбудження. Крім того, результат вимірювання не залежить від імітанса генератора і навантаження, що виключає складову методичної похибки вимірювання  $K_{mS}$  за рахунок невиконання умови  $Z_r = Z_n - \text{const}$ , присутню у відомих методах вимірювання.

Реалізація методу можлива шляхом використання вимірювальної установки, структурна схема якої зображена на рисунку 1.

До складу вимірювальної установки входять: вимірювальний генератор  $G$ ; комутатори  $K_1$  і  $K_2$ ; індикатор потужності  $П$ ; досліджуваний чотириполосник  $||W||$ ; калібрований повний опір  $Z$ .

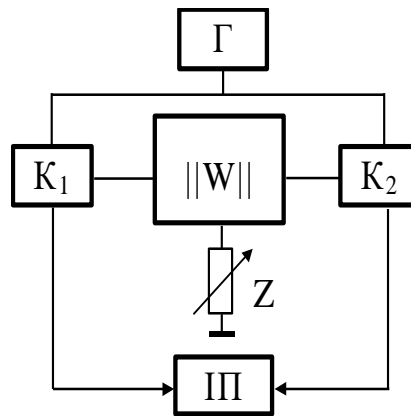


Рис. 1 - Структурна схема виміральної установки визначення  $K_{mS}$

У якості каліброваного повного опору  $Z$  використовується коло, що складається з узгоджуючого трансформатора типу Э1-46, узятим з комплексу приладу Х5-12, навантаженого на електрично керований опір, зібраний за схемою «індуктивного транзистора» [7]. В експерименті використовується індикатор і генератор панорамного вимірювача комплексних коефіцієнтів передачі Р4-11.

Процес вимірювання ґрунтується на виразі (14). За допомогою комутаторів  $K_1$  і  $K_2$  вимірвальна установка встановлюється в режим вимірювання передачі потужності в прямому напрямку. Далі йде настроювання повного опору  $Z$  до величини  $Z_1$  і фіксування цієї величини, що відповідає нульовому значенню коефіцієнта передачі ( $Y_{21} = 0$ ) у прямому напрямку. При цьому система, що складається з досліджуваного чотириполосника та опору  $Z$ , не передає потужність у навантаження. Це фіксується нульовим значенням показань П.

Процес вимірювання повторюється, із тієї різницею, що нульове значення коефіцієнта передачі по потужності встановлюється для зворотного напрямку ( $Y_{12} = 0$ ). При цьому фіксується величина повного опору  $Z_2$ .

Вимірювання і визначення за такою методикою  $K_{mS}$  дозволяє виключити з вимірального процесу похибки, властиві методам вимірювання, що використовують режими короткого замикання або холостого ходу й узгоджених навантажень, робити вимірювання характеристик напівпровідникових приладів за результатами непрямих вимірювань у НВЧ діапазоні. Цей метод може бути використаний для визначення максимально досяжного коефіцієнта передачі на межі стійкості будь-якого активного чотириполосника, що може бути описаний системою W-параметрів.

Методична похибка методу визначення максимально досяжного коефіцієнта передачі на межі стійкості чотириполосника, як показав аналіз методики вимірювання  $K_{mS}$ , залежить від точності вимірювання повного опору  $Z_1(Z_2)$ , який введений у спільну шину виміральної установки і призводить до нульового значення коефіцієнта прямої (оберненої) передачі чотириполосника.

Виходячи з виразу (14) для визначення  $K_{mS}$ , маємо :

$$K_{mS} = \left| \frac{Z_1}{Z_2} \right| = \frac{\sqrt{\operatorname{Re} Z_1^2 + \operatorname{Im} Z_1^2}}{\sqrt{\operatorname{Re} Z_2^2 + \operatorname{Im} Z_2^2}}. \quad (15)$$

Середньоквадратична похибка методу при відомому середньоквадратичному відхиленні визначення необхідного повного опору ( $\sigma_Z=0.1$ ), буде мати вид

$$\Delta K_{mS} = \sqrt{\left( \frac{\partial K_{mS}}{\partial \operatorname{Re} Z_1} \right)^2 \sigma_Z^2 + \left( \frac{\partial K_{mS}}{\partial \operatorname{Im} Z_1} \right)^2 \sigma_Z^2 + \left( \frac{\partial K_{mS}}{\partial \operatorname{Re} Z_2} \right)^2 \sigma_Z^2 + \left( \frac{\partial K_{mS}}{\partial \operatorname{Im} Z_2} \right)^2 \sigma_Z^2}. \quad (16)$$

Підставивши (15) у (16), отримаємо

$$\Delta K_{mS} = \frac{\sigma_Z}{|Z_2|^2} \sqrt{|Z_2|^2 + |Z_1|^2}. \quad (17)$$

Максимальна похибка при відомому нормальному законі розподілу пов'язана із середньоквадратичною виразом

$$\Delta X_{K_{mS}} = a \cdot \Delta K_{mS},$$

де  $a=3$ .

Оцінка похибки вимірювань проводилася на частоті 1ГГц для транзистора КТ3115 за допомогою вимірювача комплексних опорів Р4-11. Максимальне значення похибки склало 7%. Зі зростанням частоти похибка вимірювання дещо збільшується.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень розроблена методика визначення екстремальної нестандартної системи параметрів, що дозволяє підвищити точність вимірювання параметрів чотириполосника. Результати досліджень показали, що порівняно з відомим способом, похибка вимірювання зменшується та забезпечується стійкість вимірювальної установки у всіх режимах, включаючи режим негативного запасу стійкості.

Розроблений метод дозволяє провести експериментальні дослідження частотної залежності  $K_{mS}$  на межі стійкості чотириполосника, утвореного біполярним (КТ-3115) і польовим (3П321) транзисторами, включеними відповідно за схемою зі спільним емітером і спільним витоком. Одночасно контролювався внутрішній інваріантний коефіцієнт стійкості транзистора. Дослідження показали, що із зростанням частоти в діапазоні 0,1-1,0 ГГц як для польового, так і для біполярного транзистора спостерігається зміна  $K_{mS}$  із крутизною (1.5-2)дБ/ГГц. Характер зменшення  $K_{mS}$  не залежить від запасу стійкості транзистора. Оцінка похибки вимірювань проводилася на частоті 1ГГц для транзистора КТ3115 за допомогою вимірювача комплексних опорів Р4-11. Максимальне значення похибки склало 7%. Зі зростанням частоти похибка вимірювань незначно збільшується.

#### Список літератури

1. Богачев В. М. Транзисторные усилители мощности : [книга] / В. М. Богачев, В.В. Никифоров. –М.: Энергия. – 1978. – 344 с.
2. Куликовский А. А. Устойчивость активных линеаризованных цепей с усилительными приборами новых типов : [книга] / А. А. Куликовский. –М.: Госэнергоиздат, –1962. –192 с.
3. Филинюк Н. А. Нестандартная система параметров четырехполосника. – Препринт Укр НИИ-ИНТИ. – № 49. Ук – Л84 – 11.01.1984. – 15 с.
4. Филинюк Н. А. Определение параметров физической эквивалентной схемы ВЧ транзисторов / Н. А. Филинюк, С. Н. Песков, С. Н. Павлов // Радиоэлектроника (Изв. высш. учебных заведений) . – 1982. – Т. 25. – № 12. – С. 38 - 43.
5. Транзисторы. Параметры, методы измерений и испытаний / М. Г. Агапонов, В. Л. Аронов, И. Г. Бергельсон и др.; Под редакцией И. Г. Бергельсона, Ю. А. Коменецкого, Ю. А. Николаевского. – М.: Советское радио. – 1968. – 503 с.
6. Філінюк М. А. Методи визначення параметрів потенційно нестійких чотириполосників / М. А. Філінюк, О. М. Возняк // Вісник ВПІ. –1995. –№ 1. –С. 48-52.
7. Dill H. Inductive Semiconductor elements and their application in band-pass amplifier. –IRE Trans. – 1961. –v. MIL. –5, № 53. –p. 235–250.
8. Васілевський О. М. Вимірювання нестандартних параметрів потенційно нестійких чотириполосників за допомогою методу плаваючих навантажень / О. М. Васілевський, О. М. Возняк, О. Г. Ігнатенко, Д. В. Мостовий // Вісник інженерної академії України. – 2015. - №1. – С. 208 – 210.