

О.Г. Гуцало, к.т.н., доц.  
Вінницький державний технічний університет

**ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ФАЗОЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧОТИРИПОЛЮСНИКІВ ТА ЇХ НЕІДЕНТИЧНОСТІ**

*Розглядаються нові принципи побудови засобів вимірювання фазочастотних характеристик чотириполосників та їх неідентичності.*

Підвищення точності вимірювання фазочастотних характеристик (ФЧХ) чотириполосників та їх неідентичності є важливою задачею при розробці та вдосконаленні радіоелектронних пристроїв різного призначення.

З метою розв'язання поставленої задачі розглянемо принципи побудови засобів вимірювання (ЗВ) ФЧХ чотириполосників та їх неідентичності, які відрізняються від відомих більш високою точністю.

На рис. 1 наведена структурна схема ЗВ, в якій вимірювальний сигнал формується двома генераторами G1 і G2, причому частота генератора G1 підстроюється системою фазового автопідстроювання частоти, яка складається з опорного кварцового генератора G3, змішувача U1, фільтрів нижніх частот Z1 і Z2 та фазового детектора (ФД) A1, що дає змогу мати таку саму стабільність різницевої частоти генераторів, як і стабільність кварцового генератора. При цьому вихідні сигнали генераторів G1 і G2 описуються виразами:

$$U_1(t) = U_{m1} \cos[(\omega + \Omega)t + \varphi_1]; \tag{1}$$

$$U_2(t) = U_{m2} \cos[\omega t + \varphi_2]. \tag{2}$$

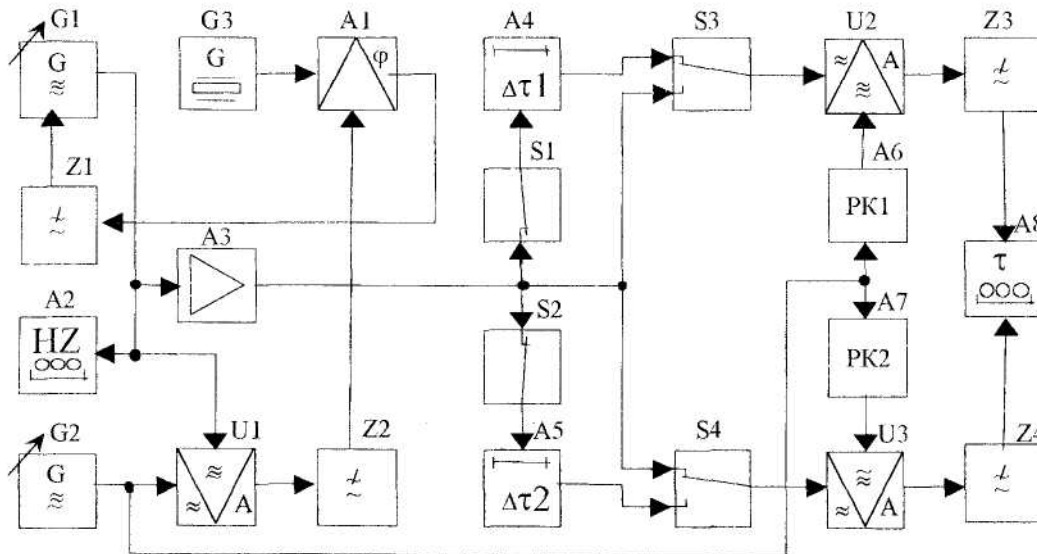


Рис. 1. Структурна схема засобу вимірювання фазочастотних характеристик чотириполосників та їх неідентичності

Сигнал (1), частота якого вимірюється частотоміром A2, надходить через підсилювач з автоматичним регулюванням підсилення (АРП) A3 на входи двох вимикачів S1 і S2 та другі входи двох перемикачів S3 і S4. При ввімкнених вимикачах сигнал (1) надходить на входи досліджуваних чотириполосників A4 і A5, вихідні сигнали яких, з урахуванням фазового зсуву, що вноситься широкосмуговим підсилювачем з АРП, описуються виразами:

$$U_3(t) = U_{m3} \cos[(\omega + \Omega)t + \varphi_1 + \varphi_3(\omega + \Omega) + \varphi_4(\omega + \Omega)]; \tag{3}$$

$$U_4(t) = U_{m4} \cos[(\omega + \Omega)t + \varphi_1 + \varphi_3(\omega + \Omega) + \varphi_5(\omega + \Omega)]; \tag{4}$$

де  $\varphi_3(\omega + \Omega)$  – фазовий зсув, що вноситься широкосмуговим підсилювачем з АРП A3;  $\varphi_4(\omega + \Omega)$ ,  $\varphi_5(\omega + \Omega)$  – фазові зсуви, що вносяться досліджуваними чотириполосниками на частоті  $\omega + \Omega$ .

Якщо перемикачі S3 і S4 знаходяться у положенні, показаному на рис. 1, то сигнали (3) і (4) надходять на перші входи змішувачів U2 і U3, на другі входи яких надходить сигнал (2) через розв'язувальні каскади A6 і A7. При цьому вихідні сигнали змішувачів описуються виразами:

$$U_5(t) = \frac{U_{m2}U_{m3}}{2} \{ \cos[\Omega t + \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_5 + \varphi_3(\omega + \Omega) + \varphi_4(\omega + \Omega)] + \cos[(2\omega + \Omega)t + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_5 + \varphi_3(\omega + \Omega) + \varphi_4(\omega + \Omega)] \}; \quad (5)$$

$$U_6(t) = \frac{U_{m2}U_{m3}}{2} \{ \cos[\Omega t + \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_6 + \varphi_3(\omega + \Omega) + \varphi_5(\omega + \Omega)] + \cos[(2\omega + \Omega)t + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_6 + \varphi_3(\omega + \Omega) + \varphi_5(\omega + \Omega)] \}, \quad (6)$$

де  $\varphi_5$  і  $\varphi_6$  – сумарні фазові зсуви, що вносяться розв'язувальними каскадами і змішувачами в кожному каналі.

Із сигналів (5) і (6) фільтрами Z3 і Z4 виділяються низькочастотні складові напруги, які описуються виразами:

$$U_7(t) = \frac{U_{m2}U_{m3}}{2} \cos[\Omega t + \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_5 + \varphi_7 + \varphi_3(\omega + \Omega) + \varphi_4(\omega + \Omega)]; \quad (7)$$

$$U_8(t) = \frac{U_{m2}U_{m3}}{2} \cos[\Omega t + \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_6 + \varphi_8 + \varphi_3(\omega + \Omega) + \varphi_5(\omega + \Omega)], \quad (8)$$

де  $\varphi_7$  і  $\varphi_8$  – фазові зсуви, що вносяться фільтрами.

При ідентичності ФЧХ розв'язувальних каскадів A6 і A7 змішувачів U2 і U3, а також фільтрів Z3 і Z4 можна прийняти, що  $\varphi_5 = \varphi_6$  та  $\varphi_7 = \varphi_8$ . Тоді сигнали (7) і (8) будуть відрізнятися тільки фазовими зсувами  $\varphi_4(\omega + \Omega)$  та  $\varphi_5(\omega + \Omega)$ .

У протилежних показаних на рис. 1 положеннях перемикачів S3 і S4 низькочастотні складові напруг на виходах фільтрів Z3 і Z4 будуть описуватися виразом:

$$U_9(t) = \frac{U_{m2}U_{m3}}{2} \cos[\Omega t + \varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_5 + \varphi_7 + \varphi_3(\omega + \Omega)]. \quad (9)$$

Якщо вимикач S1 і перемикач S3 знаходяться у положеннях, що показані на рис. 1, а вимикач S2 і перемикач S4 – у протилежних положеннях, то фазометром A8 вимірюється різниця фаз сигналів (7) і (9), яка характеризує одну із точок ФЧХ чотириполюсника A4 на частоті  $\omega + \Omega$ . Знаючи різницю фаз на даній частоті, можна розрахувати фазовий час запізнювання (ФЧЗ) сигналу:

$$\tau_1(\omega + \Omega) = \frac{\varphi_4(\omega + \Omega)}{\omega + \Omega}.$$

У положеннях вимикача S1 і перемикача S3, протилежних показаних на рис. 1, а вимикача S2 і перемикача S4 у таких же як на рис. 1, фазометром A8 вимірюється різниця фаз сигналів (8) і (9), що характеризує одну із точок ФЧХ чотириполюсника A5 на частоті  $\omega + \Omega$ . Знаючи різницю фаз на даній частоті, можна розрахувати ФЧЗ сигналу за виразом:

$$\tau_2(\omega + \Omega) = \frac{\varphi_5(\omega + \Omega)}{\omega + \Omega}.$$

Якщо вимикач S1 і перемикач S3 знаходяться у положеннях, показаних на рис. 1, то фазометром A8 вимірюється різниця фаз сигналів (7) і (9), яка характеризує неідентичність ФЧХ чотириполюсників на частоті  $\omega + \Omega$ , а неідентичність ФЧЗ сигналу буде визначатися за формулою:

$$\Delta\tau(\omega + \Omega) = \tau_1(\omega + \Omega) - \tau_2(\omega + \Omega).$$

На практиці дуже часто виникає необхідність у вимірюванні відхилення ФЧХ чотириполюсника від нормованого значення. Це може бути вирішено ЗВ неідентичності ФЧХ чотириполюсників, структурна схема якого наведена на рис. 2.

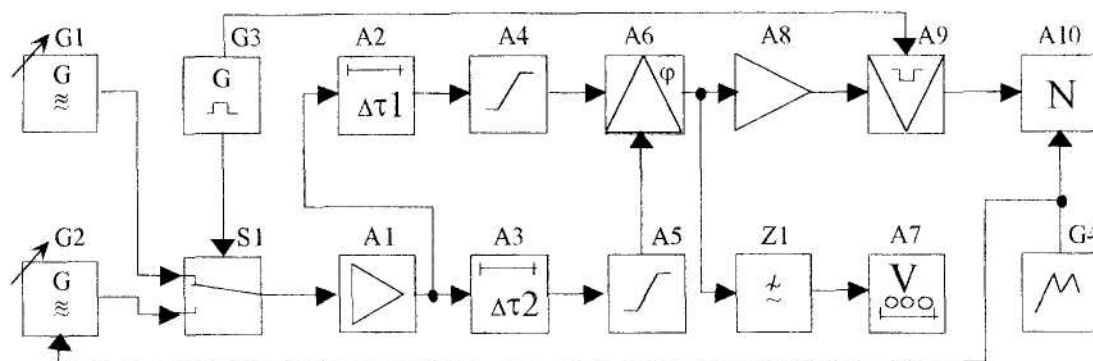


Рис. 2. Структурна схема засобу вимірювання неідентичності фазочастотних характеристик чотириполюсників у динамічному режимі

У цій схемі формування вимірювальних сигналів також здійснюється двома генераторами G1 і G2, перший з яких працює в статичному, а другий – у динамічному режимах. При цьому вихідні сигнали генераторів описуються виразами:

$$U_1^*(t) = U_{m1}^* \cos(\omega_1 t + \varphi_1); \tag{10}$$

$$U_2^*(t) = U_{m2}^* \cos[\omega_2 t + \varphi(t)]. \tag{11}$$

Сигнали (10) і (11) комутуються автоматичним комутатором (АК) S1 і періодично, з частотою комутації  $\Omega$ , що задається генератором комутуючих імпульсів G3, надходять через широкосмуговий підсилювач з АРП A1 на входи досліджуваного A2 та зразкового A3 чотириполюсників. При цьому вихідна напруга АК буде модульованою за фазою:

$$U_3^*(t) = \frac{1}{2} \{ U_{m1}^* \cos(\omega_1 t + \varphi_1) (1 - \text{sign} \sin \Omega_\kappa t) + U_{m2}^* \cos[\omega_2 t + \varphi(t)] (1 + \text{sign} \sin \Omega_\kappa t) \}.$$

У перший півперіод комутації вихідні сигнали чотириполюсників будуть описуватися виразами:

$$U_4^*(t) = \frac{1}{2} U_{m1}^{**} \cos[\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_2(\omega_1) + \varphi_3(\omega_1)] (1 - \text{sign} \sin \Omega_\kappa t); \tag{12}$$

$$U_5^*(t) = \frac{1}{2} U_{m1}^{**} \cos[\omega_1 t + \varphi_1 + \varphi_2^*(\omega_1) + \varphi_3(\omega_1)] (1 - \text{sign} \sin \Omega_\kappa t), \tag{13}$$

де  $\varphi_2(\omega_1)$ ,  $\varphi_2^*(\omega_1)$  – фазові зсуви, що вносяться відповідно досліджуваним A2 і зразковим A3 чотириполюсниками на частоті  $\omega_1$ ;  $\varphi_3(\omega_1)$  – фазовий зсув, що вноситься широкосмуговим підсилювачем з АРП A1 на частоті  $\omega_1$ .

Сигнали (12) і (13) підсилюються підсилювачами-обмежувачами A4 та A5 і надходять на входи фазового детектора ФД A6, вихідна напруга якого змінюється пропорційно різниці фаз та характеризує неідентичність ФЧХ чотириполюсників на даній частоті:

$$\Delta \varphi_\kappa(\omega_1) = \varphi_2(\omega_1) - \varphi_2^*(\omega_1) = \omega_1 [\tau_\varphi(\omega_1) - \tau_\varphi^*(\omega_1)],$$

де  $\tau_\varphi(\omega_1)$ ,  $\tau_\varphi^*(\omega_1)$  – ФЧЗ сигналу в досліджуваному та зразковому чотириполюсниках на частоті  $\omega_1$ .

У другий півперіод комутації сигнали на виходах чотириполюсників будуть описуватися виразами:

$$U_6^*(t) = \frac{1}{2} U_{m2}^{**} \cos[\omega_2 t + \varphi(t) + \varphi_4(\omega_2) + \varphi_5(\omega_2)] (1 + \text{sign} \sin \Omega_\kappa t); \tag{14}$$

$$U_7^*(t) = \frac{1}{2} U_{m2}^{**} \cos[\omega_2 t + \varphi(t) + \varphi_4^*(\omega_2) + \varphi_5(\omega_2)] (1 + \text{sign} \sin \Omega_\kappa t), \tag{15}$$

де  $\varphi_4(\omega_2)$ ,  $\varphi_4^*(\omega_2)$  – фазові зсуви, що вносяться досліджуваним A2 та зразковим A3 чотириполюсниками на частоті  $\omega_2$ ;  $\varphi_5(\omega_2)$  – фазовий зсув, що вноситься широкосмуговим підсилювачем з АРП A1 на частоті  $\omega_2$ .

При порівнянні сигналів (14) і (15) за фазовим зсувом, вихідна напруга ФД A6 також буде змінюватися пропорційно неідентичності ФЧХ чотириполюсників на частоті  $\omega_2$ . При цьому

$$\Delta\varphi_n(\omega_2) = \varphi_4(\omega_2) - \varphi_4^*(\omega_2) = \omega_2[\tau_{\phi}(\omega_2) - \tau_{\phi}^*(\omega_2)],$$

де  $\tau_{\phi}(\omega_2), \tau_{\phi}^*(\omega_2)$  – ФЧЗ сигналу в досліджуваному та зразковому чотириполосниках на частоті  $\omega_2$ .

Постійна напруга на вході ФД А6 у кожному півперіоді комутації фільтрується ФНЧ Z1 і вимірюється цифровим вольтметром А7.

За період перемикання АК S1 на вході ФД А6, крім постійної напруги, є також і змінна напруга з частотою комутації  $\Omega_k$ , амплітуда якої змінюється пропорційно різниці неідентичностей ФЧХ, яка визначається за виразом:

$$\Delta\varphi_n(\omega_2) - \Delta\varphi_n(\omega_1) = \omega_2[\tau_{\phi}(\omega_2) - \tau_{\phi}^*(\omega_2)] - \omega_1[\tau_{\phi}(\omega_1) - \tau_{\phi}^*(\omega_1)]. \quad (16)$$

Для вимірювання неідентичності ФЧХ на будь-якій частоті в межах смуги пропускання чотириполосників, частота генератора G2, що працює в динамічному режимі, зупиняється в зацікавленій точці, наприклад, в точці В, як це показано на рис. 3, а частота генератора G1 перестроюється до рівності  $\omega_1 = \omega_2$ , що еквівалентно перенесенню точки В в точку В<sub>1</sub>. При цьому амплітуда змінної складової напруги з частотою комутації  $\Omega$  на виході ФД А6, яка виділяється вибірним підсилювачем А8, і різниця фаз, що визначається за виразом (16), будуть дорівнювати нулю.

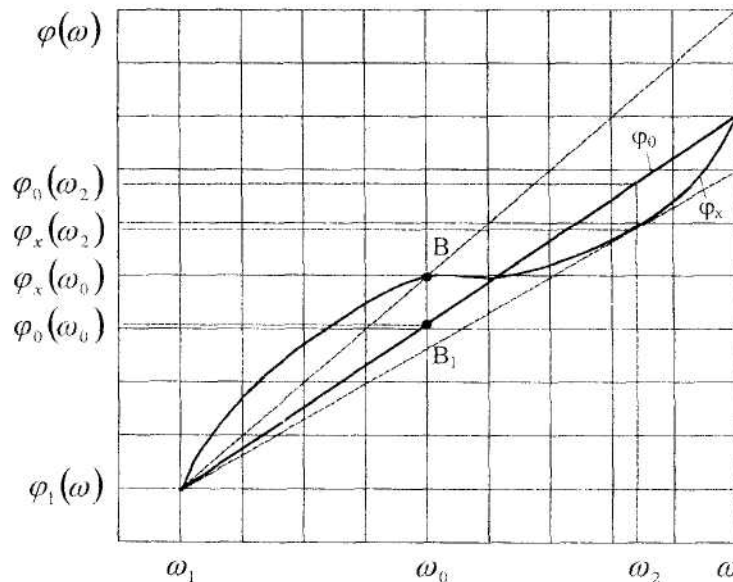


Рис. 3. Вимірювання неідентичності фазочастотних характеристик чотириполосників у динамічному режимі

При необхідності дослідження неідентичності ФЧХ навколо точки В частота генератора G2 змінюється в необхідних межах, що викликає пропорційну зміну амплітуди змінної складової з частотою комутації  $\Omega$ , яка виділяється вибірним підсилювачем А8, детектується синхронним детектором А9 і відображається на екрані осцилографа А10, горизонтальна розгортка якого здійснюється пилкоподібною напругою, що надходить з генератора G4.

ГУЦАЛО Олександр Гпатович – кандидат технічних наук, доцент Вінницького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

– вимірювальна техніка.

Подано 16.12.1999.