

## ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ МІТОК У НВЧ ВИМІРЮВАЧАХ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

### Вступ

Важливою характеристикою чотириполосника є комплексний коефіцієнт передачі, що визначається відношенням комплексних напруг на його виході і вході:

$$\bar{K}(j\omega) = \frac{\bar{U}_{\text{вих}}}{\bar{U}_{\text{вх}}}$$

Комплексний коефіцієнт передачі можна представити у вигляді

$$\bar{K}(\omega) = K(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$$

Модуль  $K(\omega)$  називають амплітудночастотною характеристикою (АЧХ) чотириполосника, аргумент  $\varphi(\omega)$  – його фазочастотною характеристикою (ФЧХ).

Прилади для вимірювання АЧХ або ФЧХ (вимірювачі ЧХ) зазвичай знімають криві частотних залежностей напруги на виході чотириполосника чи зсуву фази між вихідною та вхідною напругами чотириполосника при незмінній напрузі на його вході. Важливим при цьому є встановлення правильного частотного масштабу. З цією метою необхідно формувати сітку міток та визначати їх частоту. Існує декілька основних методів реалізації цих операцій [1].

### Огляд існуючих методів

Найпростіша структурна схема вимірювача ЧХ наведена на рис. 1. Діапазонний генератор послідовно настроюють на частоти  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , при цьому підтримують постійною напругу на його виході. По результатах вимірювань будують АЧХ досліджуваного кола [2].

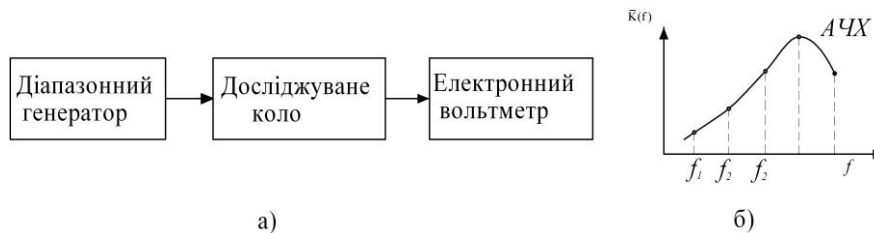


Рис. 1. Вимірювання АЧХ по точкам: структурна схема а), побудова АЧХ б)

Описаний спосіб визначення АЧХ є трудомісткий. Крім того, можуть бути пропущені різкі зміни АЧХ в проміжках між точками вимірювань. Ці недоліки особливо помітні, коли після зміни параметрів елементів досліджуваного кола всю процедуру вимірювання необхідно повторювати.

Широко використовують панорамні вимірювачі ЧХ, що побудовані на основі свіп-генератора та вузла відображення інформації (ВВІ). Використання таких приладів значно зменшує час вимірювання ЧХ. Спрощена структурна схема панорамного вимірювача АЧХ наведена на рис. 2. Основою приладу є свіп-генератор, що виробляє високочастотну напругу з постійною амплітудою і частотою, що періодично змінюється за лінійним законом [3].

Закон зміни частоти визначається формою вихідної напруги генератора розгортки. Огинаюча напруги на виході кола, що досліджується, повторює форму АЧХ (перемикач S у положенні 1). Якщо перемикач S знаходиться у положенні 2, то вихідна напруга досліджуваного кола детектується, підсилюється підсилювачем низької частоти (ПНЧ) і подається на вхід ВВІ. На екрані ВВІ з'являється зображення АЧХ досліджуваного кола. Мітки формуються в низькочастотному колі генератора розгортки, а у відповідність до напруги, що вимірюється вольтметром, ставиться їх частота. Внаслідок нестабільності свіп-генератора частота міток визначається зі значною похибкою.

Сучасний вимірювач ЧХ (рис. 3) має ряд додаткових вузлів, що підвищують точність вимірювання та покращують експлуатаційні властивості приладу (рис. 3).

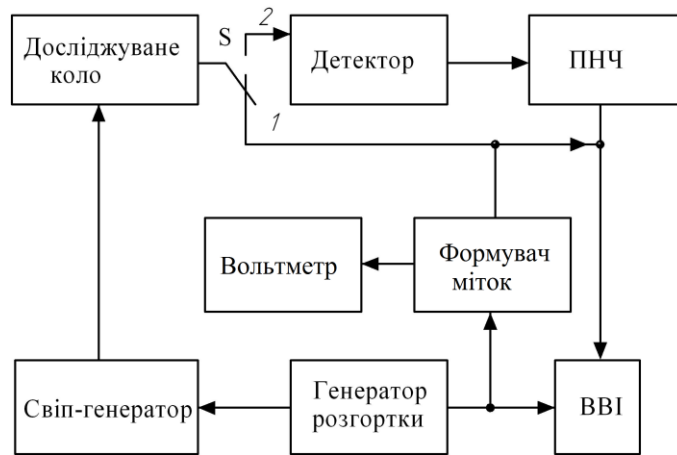


Рис. 2. Спрощена схема панорамного вимірювача АЧХ



Рис. 3. Узагальнена структурна схема панорамного вимірювача АЧХ

З принципу дії вимірювача АЧХ слідує, що розгортка по горизонталі у ВВІ повинна бути пропорційною частоті. Відхилення від лінійної залежності частоти свіп-генератора від миттєвої напруги розгортки призводять до нерівномірності частотного масштабу на екрані ВВІ і, відповідно, до спотворення форми досліджуваної АЧХ. Для усунення цього недоліку у вимірювач вводять схему лінеаризації модуляційної характеристики свіп-генератора. Зміна частоти свіп-генератора може супроводжуватися зміною напруги на його виході, що також призводить до спотворення форми досліджуваної АЧХ. Тому для стабілізації напруги в прилад вводять вузол автоматичного регулювання амплітуди (АСА). Для зміни напруги, що подається в досліджуване коло, на виході свіп-генератора включають калібрований атенюатор. Вимірювач АЧХ комплектується виносними і вбудованими детекторними головками різного призначення. Вимірювання частоти у характерних точках здійснюють за допомогою рухомих або нерухомих частотних міток. Найчастіше використовують сітку нерухомих частотних міток. Їх формують з нульових биттів напруги свіп-генератора з напругою, спектр якої містить набір необхідних калібрувальних частот. Сутність формування таких міток пояснюється структурною схемою (рис. 4).

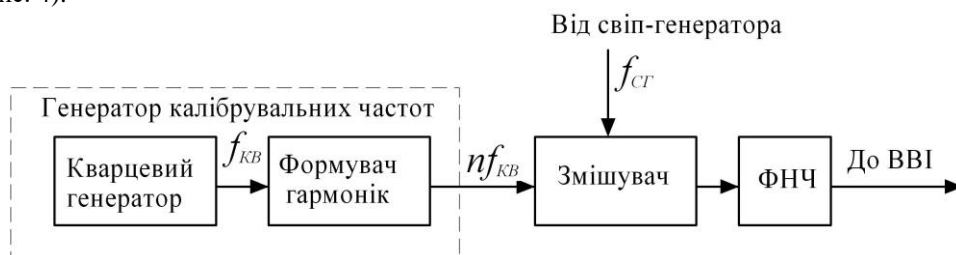


Рис. 4. Структурна схема генератора частотних міток на нульових биттях

Напруга від високостабільного кварцового генератора подається на формувач гармонік, що являє собою, наприклад, підсилювач-обмежувач з індуктивним навантаженням. Його режим роботи підбирають таким чином, щоб отримати досить велику кількість гармонік або калібрувальних частот. На

змішувач поступає напруга свіп-генератора з частотою, що змінюється за лінійним законом, і напруга з виходу формувача гармонік. Нульові биття утворюються при рівності частоти свіп-генератора відповідним калібрувальним частотам.

Утворити рухомі мітки можна за допомогою структурної схеми генератора трьох рухомих міток (рис. 5). Напругу діапазонного ВЧ генератора з частотою  $f_1$  модулюють за амплітудою від діапазонного НЧ-генератора напругою з частотою  $f_2$ . Таким чином на змішувач потрапляє напруга, що містить складові з частотами  $f_1, f_1 - f_2, f_1 + f_2$  і напруга від свіп-генератора. Частотні мітки формуються ФНЧ. Змінюючи частоти ВЧ та НЧ генераторів суміщають мітки з характерними точками досліджуваної ЧХ. Частоти визначають шляхом вимірювання частоти діапазонних генераторів.

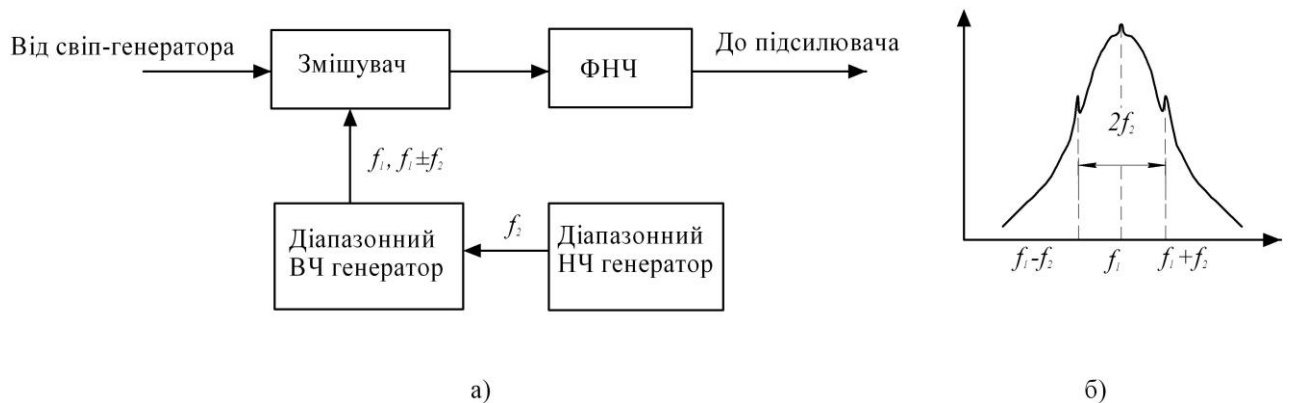


Рис. 5. Формування трьох рухомих міток: схема генератора міток а), вигляд АЧХ на екрані ВВІ б)

Іншим методом вимірювання частоти свіп-генератора є використання розгортки лінійно-ступінчастої форми. В момент часу, що відповідає початку сходінки, зупиняється частота свіп-генератора. На досліджуваній ЧХ з'являється підсвічена точка. Частоту свіп-генератора визначають частотоміром. Змінюючи положення сходінки вимірюють характерні частоти АЧХ.

Розглянуті способи хоча і дозволяють вимірювати частоти міток з достатньою точністю, але не автоматизовані та потребують значного часу вимірювання.

#### Запропонований метод

З метою автоматизації та зменшення часу вимірювання пропонується вимірювати частоту свіп-генератора за структурною схемою (рис. 6).

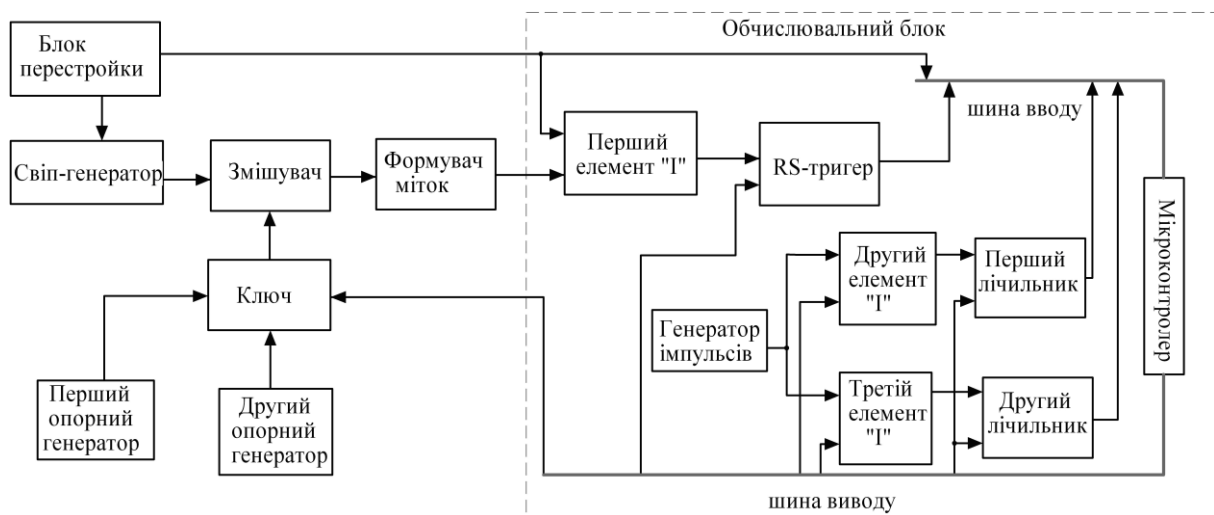


Рис. 6. Вимірювач частоти міток

Частота вихідної напруги свіп-генератора, підключеного до одного з входів змішувача змінюється за лінійним законом під час прямого ходу напруги блоку перестройки. На інший вхід змішувача подається напруга з першого опорного генератора, гармоніки якого розподілені рівномірно у робочому діапазоні частот з кроком  $f_0$ . Отже, на виході змішувача періодично будуть спостерігатися нульові биття. Вони відповідають моментам часу, коли  $f = nf_0$ , де  $f$  – миттєва частота свіп-генератора,

$n=1,2,3,\dots$  Нехай після одного з биттів опорна частота стає рівною  $f_0 + F$ . Тоді нульові биття будуть коли  $f = n(f_0 + F)$ . Часовий інтервал між биттями, коли опорна частота переключасться

$$\tau_1 = \frac{n(f_0 + F) - nf_0}{\eta} = \frac{nF}{\eta},$$

коли опорна частота незмінна

$$\tau_2 = \frac{n(f_0 + 1) - nf_0}{\eta} = \frac{f_0}{\eta},$$

де  $\eta$  - швидкість зміни частоти свіп-генератора. Тоді номер гармоніки  $n = \frac{\tau_1 \cdot f_0}{\tau_2 \cdot F}$ , а частота мітки, яку необхідно виміряти,

$$f_M = nf_0 = \frac{\tau_1 \cdot f_0^2}{\tau_2 \cdot F}. \quad (1)$$

Для усунення неоднозначності номера гармоніки  $n$  необхідно правильно обирати частоту зсуву  $F$ . Позначимо  $F_{\max}$  максимальну вимірювану частоту мітки. При виборі  $F$  необхідно виконати умову  $\frac{f_0}{F} \geq \frac{F_{\max}}{f_0}$ , звідки  $F \leq \frac{f_0^2}{F_{\max}}$ . Наприклад, якщо  $F_{\max} = 2500$  МГц,  $f_0 = 50$  МГц, то максимально можлива величина  $F$  при якій однозначно визначається номер гармоніки  $n$ :

$$F = \frac{50^2}{2500} = 1 \text{ (МГц)}.$$

Таким чином, якщо по нульовим биттям сформувати мітку, частота якої вимірюється, потім змінити опорну частоту  $f_0$  на  $f_0 + F$  і виміряти інтервал  $\tau_1$  до наступного другого биття, після чого повернути опорну частоту знову до  $f_0$  і виміряти інтервал до наступного третього биття  $\tau_2$ , то по формулі (1) визначається частота мітки.

Під час зворотнього ходу напруги розгортки нульовий потенціал на другому виході блоку перестройки поступає по шині вводу в мікроконтролер. Мікроконтролер по шині виводу формує нульові потенціали на керуючому ключі, на перших входах другого і третього елементів «І», імпульси скиду RS-тригера, першого і другого лічильника в нульові стани. В змішувачі сигнал з входу свіп-генератора змішується з багатим гармоніками сигналом першого опорного генератора. Під час прямого ходу напруги розгортки на другому виході блоку перестройки одиничний стан, тому на виході першого елемента «І» формується послідовність імпульсів міток. З появою на першому вході RS-тригера імпульсів мітки тригер переходить в одиничний стан. Інформація про це потрапляє в мікроконтролер, який перемикає ключ, формує одиничні потенціали на перших входах другого і третього елементів «І», лічильники починають рахувати імпульси, що надходять з виходу генератора імпульсів. З приходом наступної мітки на керуючому вході ключа і першому вході другого елемента «І» з'являються нульові потенціали, тим самим в першому лічильнику запишеться число  $N_1$ , пропорційне інтервалу  $\tau_1$ . RS-тригер скидається, наступна мітка знову переводить його в одиничний стан і на першому вході третього елемента «І» формується нульовий потенціал. В другому лічильнику запишеться число  $N_2$ , що пропорційне інтервалу  $\tau_2$ . Після опитування стану лічильників мікроконтролер розраховує частоту мітки за формулою

$$f_M = \frac{N_1 \cdot f_0^2}{N_2 \cdot F}$$

Усі сигнали керування, що потрапляють по шині виводу від мікроконтролера, формуються послідовно програмним шляхом. В залежності від швидкості зміни частоти свіп-генератора інтервали  $\tau_1$  і

$\tau_2$  приймають різні значення для однієї і тієї ж мітки  $f_M$ . Так, якщо при швидкості зміни частоти  $\eta_1$  частота мітки  $f_M = \frac{\tau_1}{\tau_2} \frac{f_0^2}{F}$ , то при швидкості зміни частоти  $\eta_2 = 2\eta_1$  частота тієї ж мітки  $f_M = \frac{\tau'_1}{\tau'_2} \frac{f_0^2}{F}$ , причому  $\tau'_1 = 0,5\tau_1$ ,  $\tau'_2 = 0,5\tau_2$ .

Якщо частотна смуга свіп-генератора незмінна, то, в залежності від частоти, співвідношення  $\frac{\tau_1}{\tau_2}$  приймає різні значення. Наприклад свіп-генератор працює в діапазоні 78 - 90 МГц, час прямого ходу напруги розгортки  $t = 60$  мс, мітки формуються з кроком  $f_0 = 5$  МГц, частота  $F = 100$  кГц. Інтервали часу між появами імпульсів на виході формувача частотних міток  $\tau_1 = 8$  мс,  $\tau_2 = 25$  мс. Тоді частота мітки

$$f_M = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{f_0^2}{F} = \frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \frac{f_0^2}{F} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{(5 \cdot 10^6)^2}{0,1 \cdot 10^6} = 80 \text{ (МГц)}.$$

При зміні граничних частот свіп-генератора, наприклад, до 38 - 50 МГц, змінюється співвідношення між  $\tau_1$  і  $\tau_2$ . Частота вимірюваної мітки в цьому випадку

$$f_M = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{f_0^2}{F} = \frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \frac{f_0^2}{F} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{(5 \cdot 10^6)^2}{0,1 \cdot 10^6} = 40 \text{ (МГц)}.$$

В мікроконтролері проводиться також операція множення отриманого відношення  $\frac{\tau_1}{\tau_2}$  на константу  $\frac{f_0^2}{F}$ . У вимірювачі АЧХ, в залежності від частотного діапазону,  $f_0$  та  $F$  можуть приймати різні значення. В обчислювальному блоці це буде враховуватися записом в постійну пам'ять потрібних констант  $\frac{f_0^2}{F}$ , ніяких додаткових схемних рішень не потрібно. Для обчислення частоти міток обчислювальний блок витрачає час

$$T = \tau_2 + T_p,$$

де  $T_p$  - часовий інтервал, необхідний мікроконтролеру для вводу з лічильників чисел  $N_1, N_2$  і розрахунку частоти мітки [4].

#### Аналіз похибок

Точність визначення частоти мітки залежить від похибки, що викликана нелінійністю розгортки блока перестройки, неточності встановлення частот  $f_0$ ,  $f_1 = f_0 + F$  опорних генераторів, динамічних явищ, що виникають у вузькосмуговому формувачі міток. Оцінимо максимальну відносну похибку визначення частоти міток  $f_M$ , викликану нестабільністю опорних генераторів. Так як  $f_0 \approx f_1$ , то припускаємо, що максимальне відхилення частоти обох генераторів не перевищує  $\Delta$ . Тоді  $f_0^* = f_0 \pm \Delta$ ,  $f_1^* = f_1 \pm \Delta$ . Вирази для точного, максимального та мінімального відхилення відношень  $\frac{\tau_1}{\tau_2}$  наступні:

$$\left( \frac{\tau_1}{\tau_2} \right)_{\text{ТОЧНЕ}} = \frac{nF}{f_0} = \frac{n(f_1 - f_0)}{f_0} \quad \text{при } \Delta = 0;$$

$$\left( \frac{\tau_1}{\tau_2} \right)_{\text{MAX}} \approx \frac{n(f_1 - f_0 + 2\Delta)}{f_0} \quad \text{при } f_0^* = f_0 - \Delta, f_1^* = f_1 + \Delta;$$

$$\left( \frac{\tau_1}{\tau_2} \right)_{\text{MIN}} \approx \frac{n(f_1 - f_0 - 2\Delta)}{f_0} \quad \text{при } f_0^* = f_0 + \Delta, f_1^* = f_1 - \Delta.$$

Неважко показати що

$$\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)_{MAX} - \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)_{ТОЧНЕ} \approx \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)_{ТОЧНЕ} - \left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)_{MIN} \approx \frac{2n\Delta}{f_0}.$$

Отже, обчислене значення частоти мітки

$$f_M^* = \frac{f_0^2}{F} \left( \frac{\tau_1}{\tau_2} \pm \frac{2n\Delta}{f_0} \right) = f_M + \frac{f_0}{F} 2n\Delta,$$

де  $f_M$  – точна частота мітки. Максимальна відносна похибка

$$\gamma = \pm \frac{2nf_0\Delta}{F} \cdot \frac{1}{f_M} = \pm 2 \frac{\Delta}{F}.$$

Нехай частоти першого і другого опорних генераторів  $f_0 = 50$  МГц,  $f_1 = 51$  МГц з абсолютною нестабільністю частоти  $\Delta \leq 100$  Гц. Тоді максимальна відносна похибка визначення частоти міток

$$\gamma = \pm 2 \cdot \frac{10^2}{10^6} = \pm 2 \cdot 10^{-4} = \pm 0,02\%$$

Такі опорні генератори можуть бути побудовані на основі кварцових резонаторів, а похибка визначення частоти міток, що викликана їх частотною нестабільністю, є малою.

#### **Висновки**

Використовуючи високостабільні кварцові генератори та сучасні мікропроцесори можна досягти високоточного та автоматичного визначення частоти міток, що суттєво спростить вимірювання частотних характеристик радіотехнічних кіл.

#### **Література**

1. Дворяшин Б. В. Основы метрологии и радиоизмерения: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.: ил.
2. Нефедов В.И., Сигов А.С., Битюков В.К. Метрология и радиоизмерения. Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2006. – 384 с.: ил.
3. Тихонова Б.Н Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах. Учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2002. – 374 стр.
4. Трапперт В. AVR-RISC мікроконтролери. – К.: МК-Прес, 2006. – 464 с. іл.

**Кофанов Віктор Леонідович** – кандидат технічних наук, професор кафедри радіотехніки.

**Кононов Сергій Павлович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення.

**Вельгус Євген Миколайович** – магістрант кафедри телекомунікаційних систем та телебачення.

Тел. (0432)598358,

E-Mail: velhus@ukr.net

Вінницький національний технічний університет