

Ю.Ф. ПАВЛЕНКО, докт. техн. наук, проф. НТУ “ХПІ” (м.Харків)

І.С. КРАВЧЕНКО, магістр НТУ “ХПІ” (м.Харків)

В.М. КОЩІЙ, магістр НТУ “ХПІ” (м.Харків)

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ МОДУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ У ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЙМАЧАХ

В статье рассмотрен метод измерения нелинейных искажений амплитудно- и частотно-модулируемых сигналов в тракте измерительного приемника (модулометра), в котором в качестве критерия нелинейных искажений используется комбинационная составляющая, которая возникает при подаче на модулометр сигнала с двухчастотной модуляцией.

In the article the method of measuring of nonlinear distortions of the amplitude- and frequency-modulated signals is considered in the highway of susceptor in which as a criterion of nonlinear distortions a petticoat constituent which arises up at a serve on susceptor signal with twofrequency modulation is used.

Одним з параметрів, який нормується у вимірювальних прийमाках модульованих сигналів (модулометрах), є коефіцієнт нелінійних спотворень модуляції, що вноситься трактом модулометра.

Як правило, він нормується у формі коефіцієнта гармонік (КГ). Наприклад, якщо на вхід модулометра (в режимі частотної модуляції) подано частотно-модульований (ЧМ) сигнал з гармонічною модуляцією

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t),$$

де $\frac{\omega}{2\pi} = f$ - несуча частота; $\frac{\Omega}{2\pi} = F$ - модулююча частота; $\frac{\Delta\omega}{2\pi} = \Delta f$ - девіація частоти, то через нелінійність деяких пристроїв модулометра на виході демодулятора виникають гармоніки модулюючої частоти, а коефіцієнт гармонік визначається за виразом:

$$K_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^m \Delta\omega_i^2}}{\Delta\omega_1} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^m U_i^2}}{U_1} \quad (1)$$

Якщо на виході модулометра включити вимірювач КГ, то при ідеальному ЧМ сигналі на вході буде виміряний КГ модулометра. Цей метод одержав назву методу прямого вимірювання (рис. 1).

Неважко побачити, що фактично в цьому методі буде виміряна сума КГ генератора і модулометра, оскільки при формуванні ЧМ сигналу також мають місце спотворення ЧМ, сорозмірні зі спотвореннями в модулометрі.

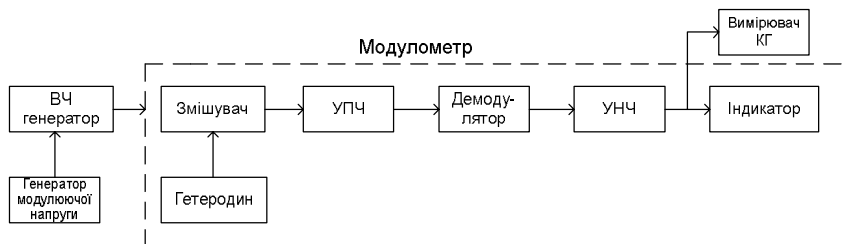


Рис. 1 – Структурна схема методу прямого вимірювання

Таким чином, роздільна здатність методу прямого вимірювання обмежена рівнем КГ генератора.

В той же час сьогодні в Україні експлуатується значна кількість приладів закордонного виробництва з високими метрологічними характеристиками, які треба періодично калібрувати і повірити для їх легітимного використання. Покупець цих приладів вимушений або звертатись в сервісні центри закордонних фірм (що дуже затратно і не завжди можливо), або в місцеві метрологічні лабораторії, які не завжди здатні виконати необхідні операції на достатньому рівні.

Нижче описано так званий «метод комбінаційних частот», який дозволяє вимірювати малі нелінійні спотворення модульованих сигналів в модулометрах (рис. 2). Цей метод добре відомий для вимірювання нелінійності квазілінійних чотирьохполюсників при гармонічному сигналі [1]. Він полягає в поданні двох гармонічних сигналів з частотами F_1 і F_2 на чотириполюсник, що досліджується, і використанні в якості критерія нелінійних спотворень комбінаційних складових з частотами $pF_1 \pm qF_2$ ($p, q = 1, 2, 3, \dots$) в спектрі на виході чотирьохполюсника. В [1, 2] показано, що відношення амплітуд спектральних складових з комбінаційними частотами до амплітуд складових з частотами F_1 або F_2 перераховується в еквівалентний КГ за формулами (при $U_{F_1} = U_{F_2}$):

$$K_{F_2} = \frac{U_{F_1 \pm F_2}}{U_{F_1}}; \quad (2)$$

$$K_{F_3} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{F_1 \pm 2F_2}}{U_{F_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{2F_2 \pm F_1}}{U_{F_1}}. \quad (3)$$

Основною перевагою методу комбінаційних частот є те, що КГ випробувальних сигналів не впливають на роздільну здатність вимірювання КГ чотирьохполюсника.

Стосовно вимірювань нелінійних спотворень ЧМ сигналів у тракці модулометра метод полягає в формуванні ЧМ сигналу з двохчастотним

модулюючим сигналом і вимірюванні складових з комбінаційними частотами $\Delta\omega_{p\Omega_1+q\Omega_2}$, які виникають через нелінійність тракту модулятора [2].

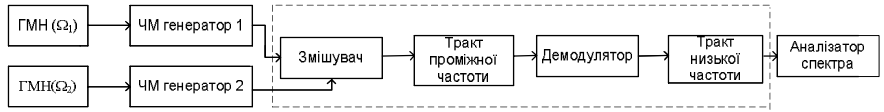


Рис. 2 – Структурна схема реалізації методу комбінаційних частот (режим ЧМ)

Структурна схема пристрою для вимірювання комбінаційних спотворень в модулометрі наведена на рис. 2. За допомогою двох генераторів модулюючих напруг (ГМН) з частотами Ω_1 та Ω_2 , двох ЧМ генераторів і змішувача (зовнішнього або змішувача модулометра) формується вимірювальний ЧМ сигнал:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \frac{\Delta\omega_1}{\Omega_1} \sin \Omega_1 t + \frac{\Delta\omega_2}{\Omega_2} \sin \Omega_2 t). \quad (4)$$

Цей сигнал подається на модулометр, на виході якого в результаті не лінійності демодуляційної характеристики ЧД і фазових характеристик лінійних вузлів виникають комбінаційні складові виду $p\Omega_1 \pm q\Omega_2$.

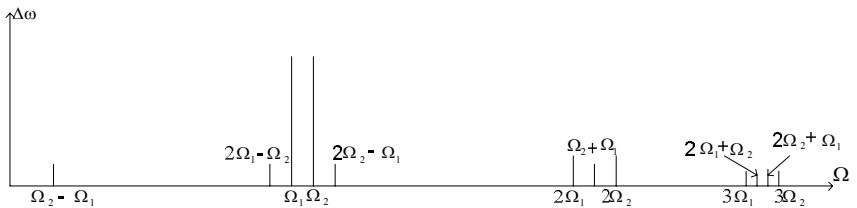


Рис. 3 – Спектр сигналу на виході модулометра

Спектр сигналу на виході модулометра буде містити складові з частотами Ω_1 і Ω_2 , гармоніками цих частот $p\Omega_1$ і $q\Omega_2$, а також комбінаційними частотами $p\Omega_1 \pm q\Omega_2$ (рис. 3).

Критеріями нелінійних спотворень 2-го порядку є складові з частотами $2\Omega_1$, $2\Omega_2$, а також $\Omega_2 - \Omega_1$, $\Omega_2 + \Omega_1$, 3-го порядку – складові з частотами $3\Omega_1$, $3\Omega_2$, а також $2\Omega_1 \pm \Omega_2$, $2\Omega_2 \pm \Omega_1$. Як вже було сказано, в цьому методі в якості критеріїв нелінійності модулометра ми обираємо комбінаційні частоти.

Відношення $\Delta\omega_{p\Omega_1+q\Omega_2} / \Delta\omega_{\Omega_2}$ вимірюється за допомогою аналізатора спектра (АС) та перераховується за формулами, аналогічними (2) та (3):

$$K_{r2} = \frac{\Delta\omega_{\Omega_1 \pm \Omega_2}}{\Delta\omega_{\Omega_1}} = \frac{U_{\Omega_1 \pm \Omega_2}}{U_{\Omega_1}}; \quad (5)$$

$$K_{r3} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\omega_{2\Omega_1 \pm \Omega_2}}{\Delta\omega_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\omega_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{\Delta\omega_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}}. \quad (6)$$

На відміну від методу прямого вимірювання в цьому методі нелінійності ЧМ генераторів не впливають на результати вимірювання КГ модулометра, оскільки кожен з генераторів модулюється однією частотою. Тому комбінаційні складові можуть виникнути лише в модулометрі. Іншими словами, метод дозволяє досліджувати прецизійні прилади за допомогою непрецизійних, що є його головною перевагою.

Схема вимірювання КГ модулометра в режимі амплітудної модуляції дещо відрізняється. Справа в тому, що формувати модульований двома частотами АМ сигнал за допомогою змішувача неможливо (змішувач грає роль амплітудного обмежувача). Тому тут використовується лінійний суматор двох АМ сигналів з однією несучою частотою і різними модулюючими частотами (рис. 4).

За допомогою двох генераторів модулюючих напруг, двох амплітудних модуляторів, а також генератора несучих частот, загального для обох модуляторів, на виході лінійного суматора формується вимірювальний АМ сигнал:

$$u(t) = U_m (1 + m_1 \sin \Omega_1 t + m_2 \sin \Omega_2 t) \sin \omega t, \quad (7)$$

де m_1 і m_2 - коефіцієнти АМ з частотами Ω_1 і Ω_2 .

Сигнал (7) подається на вхід модулометра (режим АМ). Нелінійність вузлів модулометра приводить до того, що на виході модулометра з'являються комбінаційні складові виду $p\Omega_1 \pm q\Omega_2$. Як і в режимі ЧМ, комбінаційні складові у вимірювальному сигналі (формула 7) виникнути не можуть, оскільки кожний з амплітудних модуляторів модулюється тільки однією із частот: Ω_1 або Ω_2 , а суматор є лінійним пристроєм. Тому амплітуди $U_{p\Omega_1 \pm q\Omega_2}$ комбінаційних складових на виході модулометра є мірою нелінійності його тракту й можуть бути перераховані в КГ за формулами, аналогічними для режиму ЧМ:

$$K_{r2} = \frac{m_{\Omega_1 \pm \Omega_2}}{m_{\Omega_1}} = \frac{U_{\Omega_1 \pm \Omega_2}}{U_{\Omega_1}}; \quad (8)$$

$$K_{r3} = \frac{4}{3} \cdot \frac{m_{2\Omega_1 \pm \Omega_2}}{m_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{m_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{m_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}} \quad (9)$$

Наведемо приклад практичної реалізації цього методу для калібрування модулометра СКЗ-45. Калібрування КГ проводиться при максимальних значеннях девіації частоти і коефіцієнта АМ для даного приладу (для СКЗ-45

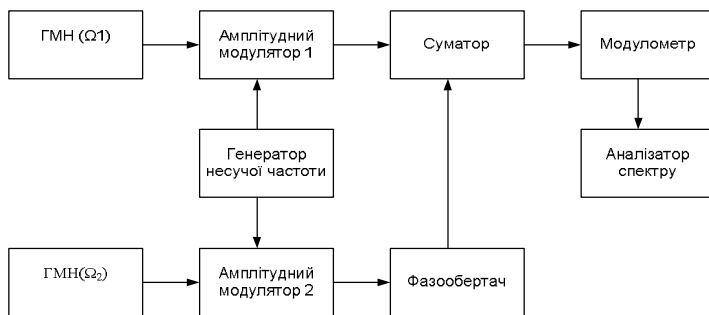


Рис. 4 – Структурна схема методу комбінаційних частот (режим «АМ»)

$\Delta f_{\max} = 1000$ кГц, $m_{\max} = 100\%$), а також для 1-2 проміжних значень (табл. 1).

Таблиця 1

№ п/п	Значення Δf , кГц			Значення m , %		
	Δf_{Ω_1}	Δf_{Ω_2}	Δf_{Σ}	m_{Ω_1}	m_{Ω_2}	m_{Σ}
1	50	50	100	25	25	50
2	100	100	200	40	40	80
3	500	500	1000	50	50	100

Рекомендовані значення модулюючих частот F_1 і F_2 , а також значення комбінаційних частот спектральних складових, які використовуються для вимірювання, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

№ №	F_1 , кГц	F_2 , кГц	$F_2 - F_1$	$2F_2 - F_1$	$2F_1 - F_2$	K_{r2}	K_{r3}
1	0,9	1	0,1	1,1	0,8	$\frac{U_{\Omega_2 - \Omega_1}}{U_{\Omega_2}}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2}}{U_{\Omega_1}}$
2	9	10	1	11	8		
3	90	100	10	110	80		

Розглянемо процедуру вимірювання K_r для максимальних Δf і m .

Режим ЧМ: $\Delta f_{\max} = 1000$ кГц.

Встановлюємо: $\Delta f_{\Omega_1} = 500$ кГц; $\Delta f_{\Omega_2} = 500$ кГц; $\Delta f_{\Sigma} = 1000$ кГц.

Вимірюємо: $\frac{\Delta f_{\Omega_2 - \Omega_1}}{\Delta f_{\Omega_1}} = -50$ дБ = 0,32 %; $K_{r2} = 0,32$ %.

$$\text{Розраховуємо: } \frac{\Delta f_{\Omega_2 - \Omega_1}}{\Delta f_{\Omega_1}} = -65 \text{ дБ} = 0,06 \% ; K_{r_3} = \frac{4}{3} \cdot 0,07 = 0,08 \% .$$

Режим АМ: $m_{\max} = 100 \% .$

$$\text{Встановлюємо: } m_{\Omega_1} = 50 \% ; m_{\Omega_2} = 50 \% ; m_{\Sigma} = 100 \% .$$

$$\text{Вимірюємо: } \frac{m_{\Omega_2 - \Omega_1}}{m_{\Omega_1}} = -45 \text{ дБ} = 0,56 \% ; K_{r_2} = 0,56 \% .$$

$$\text{Розраховуємо: } \frac{m_{\Omega_2 - \Omega_1}}{m_{\Omega_1}} = -70 \text{ дБ} = 0,03 \% ; K_{r_3} = \frac{4}{3} \cdot 0,03 = 0,04 \% .$$

Висновки: таким чином, метод комбінаційних частот може бути успішно використаний для вимірювання нелінійних спотворень модульованих сигналів у вимірювальних приймачах (модулометрах). Важливою перевагою цього методу є той факт, що при його реалізації не висуваються жорсткі вимоги до джерел модульованих сигналів, що дозволяє проводити калібрування (перірку) прецизійних модулометрів непрецизійними генераторами. Метод реалізується за допомогою промислових приладів і знайшов широке використання в метрологічній практиці.

Список літератури: 1. Соловьев Н. Н. . Измерительная техника в проводной связи. Ч. III. Измерения параметров, характеризующих искажения сигналов связи / Н. Н. Соловьев. – М. : Связь, 1971. – 304 с. 2. Болмусов Ю. Д., Павленко Ю. Ф., Соколовский Н. П. Метрологическое обеспечение измерителей модуляции / Ю. Д. Болмусов, Ю. Ф. Павленко, Н. П. Соколовский. – М. : Военное издательство, 1992. – 192 с.