

Ю.Ф. ПАВЛЕНКО, д-р. техн. наук, проф. НТУ “ХПІ”;

І.С. КРАВЧЕНКО, магістр НТУ “ХПІ”;

В.М. КОЩІЙ, магістр НТУ “ХПІ”

МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ МОДУЛЬОВАНИХ СИГНАЛІВ У ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЙМАЧАХ

У статті розглянуто метод виміру нелінійних спотворень амплітудно- і частотно-модульованих сигналів в тракті вимірювального приймача (модулометра), в якому як критерій нелінійних спотворень використовується комбінаційна складова, яка виникає при подачі на модулометр сигналу з двочастотною модуляцією.

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 приймачах 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.

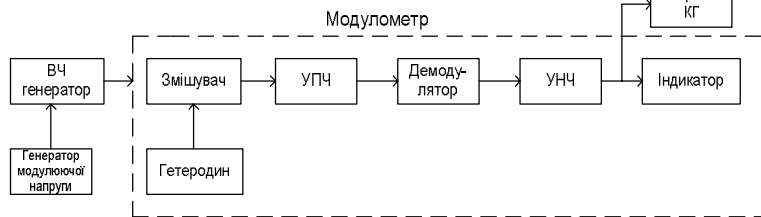


Рис. 1. Структурна схема методу прямого вимірювання

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 чотирьохполосників при гармонічному сигналі [1]. Він полягає в поданні двох гармонічних сигналів з частотами F_1 і F_2 на чотирьохполосник, 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 чотирьохполосника. 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 $U_{F_1} = U_{F_2}$):

$$K_{r2} = \frac{U_{F_1 \pm F_2}}{U_{F_1}}; \quad (2)$$

$$K_{r3} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{F_1 \pm 2F_2}}{U_{F_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{2F_2 \pm F_1}}{U_{F_1}}. \quad (3)$$

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

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].

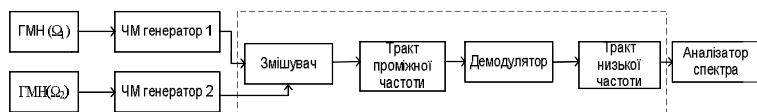


Рис. 2. Структурна схема реалізації методу комбінаційних частот (режим ЧМ)

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 $p\Omega_1 \pm q\Omega_2$.

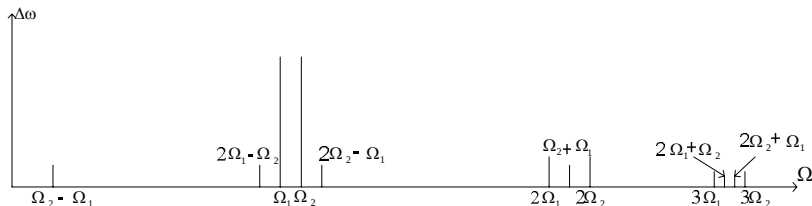


Рис. 3. Спектр сигналу на виході модулометра

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):

$$K_{Г2} = \frac{\Delta\omega_{\Omega_1 \pm \Omega_2}}{\Delta\omega_{\Omega_1}} = \frac{U_{\Omega_1 \pm \Omega_2}}{U_{\Omega_1}}; \quad (5)$$

$$K_{Г3} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\omega_{2\Omega_1 \pm \Omega_2}}{\Delta\omega_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\omega_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{\Delta\omega_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}}. \quad (6)$$

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. 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 $U_{p\Omega_1 + q\Omega_2}$ комбінаційних складових на виході модулометра є мірою нелінійності його тракту й можуть бути перераховані в КГ за формулами, аналогічними для режиму ЧМ:

$$K_{Г2} = \frac{m_{\Omega_1 \pm \Omega_2}}{m_{\Omega_1}} = \frac{U_{\Omega_1 \pm \Omega_2}}{U_{\Omega_1}}; \quad (8)$$

$$K_{Г3} = \frac{4}{3} \cdot \frac{m_{2\Omega_1 \pm \Omega_2}}{m_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{m_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{m_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}} \quad (9)$$

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)

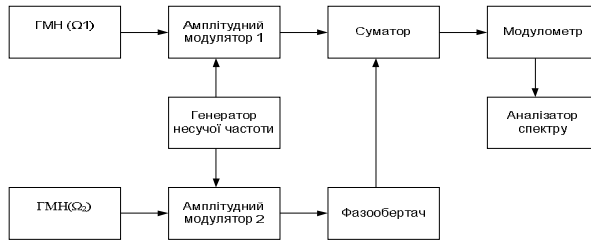


Рис. 4. Структурна схема методу комбінаційних частот (режим «АМ»)

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

Таблиця 1

Значення девіації частоти і коефіцієнта АМ

№ 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

Модулюючі частоти F_1 і F_2 та комбінаційні частоти спектральних складових

№	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	$\frac{U_{\Omega_2 - \Omega_1}}{U_{\Omega_2}}$	$\frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}} =$ $= \frac{4}{3} \cdot \frac{U_{\Omega_1 \pm 2\Omega_2}}{U_{\Omega_1}}$
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: $\frac{\Delta f_{\Omega_2 - \Omega_1}}{\Delta f_{\Omega_1}} = -50 \text{ дБ} = 0,32 \text{ \%}; K_{\Gamma_2} = 0,32 \text{ \%}.$

Розраховуємо: $\frac{\Delta f_{\Omega_2 - \Omega_1}}{\Delta f_{\Omega_1}} = -65 \text{ дБ} = 0,06 \text{ \%}; K_{\Gamma_3} = \frac{4}{3} \cdot 0,07 = 0,08 \text{ \%}.$

Режим АМ: $m_{\max} = 100 \text{ \%}.$

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

Вимірюємо: $\frac{m_{\Omega_2 - \Omega_1}}{m_{\Omega_1}} = -45 \text{ дБ} = 0,56 \text{ \%}; K_{\Gamma_2} = 0,56 \text{ \%}.$

Розраховуємо: $\frac{m_{\Omega_2 - \Omega_1}}{m_{\Omega_1}} = -70 \text{ дБ} = 0,03 \text{ \%}; K_{\Gamma_3} = \frac{4}{3} \cdot 0,03 = 0,04 \text{ \%}.$

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 (півірку) 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 . – М. : Военное издательство, 1992. – 192 с.

Надійшла до редколегії 08.04.2012