

УДК 682.9

К.С. Козелкова

ДП "Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління", Київ

## ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ В РАДІОЛІНІЯХ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ КОМПЛЕКСУ УПРАВЛІННЯ КОСМІЧНИМ АПАРАТОМ

Розглянуто питання дослідження нелінійних спотворень в радіолініях передачі інформації комплексу управління космічним апаратом. Отримані аналітичні співвідношення дозволяють знаходити інтегральні умови узгодження командно-вимірювальної системи радіотехнічного комплексу з динамічним діапазоном вхідних дій.

**Ключові слова:** антенно-приймальний пристрій, космічний апарат, радіотехнічний комплекс.

### Вступ

Для дослідження нелінійних спотворень в радіолініях передачі інформації комплексу управління КА науковим завданням є розвиток теорії функціональних розкладань у напрямі розширення їх аналітичних можливостей для дослідження нелінійних інерційних КВС.

Розглянемо багатокаскадні РТК з частотно-залежними і, в загальному випадку, різними нелінійними прохідними характеристиками їх каскадів. При цьому особливий інтерес викликає визначення умов узгодження РТК з вхідними діями. Для вузько-смужових (по відношенню до частоти, що несе) РТК, що працює в малосигнальному режимі, для якого характерні в основному нелінійні спотворення третього порядку [1, 2] ряд Вольтера в багатовимірній комплексній області має такий вигляд [3]:

$$Y(f_1, f_2, \dots, f_n) = \sum_{n=1}^{\infty} H_n(f_1, f_2, \dots, f_n) \prod_{i=1}^n X(f_i) \cong \quad (1)$$

$$\cong H_1(f_1)X(f_1) + H_3(f_1, f_2, -f_3)X(f_1)X(f_2)X(-f_3),$$

де  $X(\cdot)Y(\cdot)$  – перетворення Фур'є вхідного і вихідного сигналів, відповідно;  $H_n$  – нелінійна передавальна функція (ядро Вольтера)  $n$ -го порядку;  $f_i$  – аргументи багатовимірного перетворення Фур'є. Тоді динамічний діапазон по інтермодуляційних спотвореннях можна знайти як [3, 4]:

$$D_1(f') = \frac{1}{[X_{\min}(f')]^{2/3}} \sqrt[3]{K_1 \frac{H_1(f')}{H_3(f_1, f_2, -f_3)}}, \quad (2)$$

де  $K_1$  – константа, що оцінює допустимий рівень інтермодуляційних спотворень (зазвичай  $K_1 = 0,01$ ;  $0,001$ );  $X_{\min}$  – мінімальний рівень вхідного сигналу, що визначає чутливість радіосистеми;  $f_1, f_2, f_3$  – частоти вхідної дії, причому частота  $f'=(f_1+f_2-f_3)$  повинна потрапляти в смугу пропускання по виходу радіопристрою  $\Delta f_{\text{вих}}$ , а частоти  $f_1, f_2, f_3$  повинні потрапляти в смугу пропускання по входу радіопристрою  $\Delta f_{\text{вх}}$ .

Динамічний діапазон радіосистеми по перехресних спотвореннях характеризується виразом [3, 4]

$$D_2(f'') = \frac{1}{X_{\min}(f'')} \sqrt{K_2 \frac{H_1(f'')}{H_3(f, f_1, -f_2)}}, \quad (3)$$

де  $K_2$  – константа, що визначає максимально допустимий для даного радіопристрою рівень перехресних спотворень (зазвичай  $K_2=0,01;0,001$ );  $f_1, f_2, f_3$  – частоти сигналів, що приймаються, і вхідних дій, відповідно, причому частота  $f''=(f+f_1-f_2)$  повинна потрапляти в смугу пропускання по виходу радіопристрою  $\Delta f_{\text{вих}}$ , а частоти  $f, f_1, -f_2$  повинні потрапляти в смугу пропускання по входу радіопристрою  $\Delta f_{\text{вх}}$ .

**Метою статті** є дослідження нелінійних спотворень в радіолініях передачі інформації комплексу управління космічним апаратом.

### Результати досліджень

Враховуючи необхідність створення і функціонування перспективних РТК чутливість командно-вимірювальних систем буде визначатися з вираження (2) і (3) відповідно

$$X_{\min}(f') = \sqrt{K_1 \frac{H_1(f')}{D_1^3(f')H_3(f_1, f_2, -f_3)}}; \quad (4)$$

$$X_{\min}(f'') = \sqrt{K_2 \frac{H_1(f'')}{D_2^2(f'')H_3(f, f_1, -f_2)}}. \quad (5)$$

Радіотехнічним комплексом є каскадне з'єднання  $m$  ( $m=2,3,\dots$ ) радіоелектронних пристроїв. Тоді динамічний діапазон каскадного з'єднання по інтермодуляційних спотвореннях матиме вигляд [2, 3]

$$D_1(f') = \frac{1}{[X_{\min}(f')]^{2/3}} \sqrt[3]{K_1 \frac{\prod_{e=m}^1 H_{e1}(f')}{\sum_{j=1}^m [\prod_{g=m} H_{g1}(f_1, f_2, -f_3)]}} \times \sqrt[3]{\frac{1}{H_{g3}(f_1, f_2, -f_3) \prod_{i=1}^3 [\prod_{K=j-1}^1 H_{K1}(f_i)]}}, \quad (6)$$

де  $H_{ji}(\cdot)$  – нелінійні передавальні функції  $i$ -го ( $i=1,3$ ) порядку  $j$ -го ( $j=1,2,\dots,m$ ) каскаду, причому першими вважаються вхідні каскади АПП. Динамічний діапазон каскадного з'єднання по перехресних спотвореннях описується формулою [2, 4]:

$$D_2(f'') = \frac{1}{X_{\min}(f'')} \sqrt{K_2 \frac{\prod_{e=m}^1 H_{e1}(f'')}{\sum_{j=1}^m [\prod_{g=m}^{j+1} H_{g1}(f, f_1, -f_2)]}} \times \frac{1}{H_{j3}(f, f_1, -f_2) \prod_{i=1}^3 [\prod_{K=j-1}^1 H_{K1}(f_i)]}, \quad (7)$$

З формул (2) і (3) виходить, що  $D_1$  ( $D_2$ ) менше для всіх  $i=1,2,3,\dots,m$ , де  $D_{i1}$  ( $D_{i2}$ ) –динамічний діапазон  $i$ -го каскаду ( $i$ -го радіоелектронного пристрою). У разі, коли динамічні діапазони всіх  $m$  каскадів рівні  $D_{i1}$  ( $D_{i2}$ ) і  $\Delta f_{\text{вх}i} = \Delta f_{\text{вих}i}$ ,  $\forall i=1,\dots,m$ , то динамічний діапазон даного РТК визначається наступними виразами [2, 5]

$$D_1 = \frac{D_{i1}}{\sqrt[3]{m}}; \quad D_2 = \frac{D_{i2}}{\sqrt{m}}. \quad (8)$$

Якщо динамічний діапазон вхідних дій ширше динамічного діапазону  $m$ -каскадного радіоприймального тракту, то для узгодження необхідно збільшити динамічні діапазони окремих каскадів, що еквівалентно зменшенню їх нелінійних передавальних функцій третього порядку [3].

У окремому випадку, коли динамічні діапазони окремих каскадів  $D_{i1}$  ( $D_{i2}$ ) і вхідних дій  $D_{\text{вх}}$  рівні, для узгодження радіоприймального тракту з динамічним діапазоном сигналів на його вході необхідно зменшити передавальну функцію третього порядку  $i$ -го каскаду в  $n_i$  разів, тобто

$$H_{i3}^*(f_1, f_2, -f_3) = \frac{1}{n_i} H_{i3}(f_1, f_2, -f_3), \quad (9)$$

де  $H_{i3}^*$  – скоректована нелінійна передавальна функція, причому

$$\sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i} \leq 1.$$

Це еквівалентно збільшенню динамічних діапазонів  $i$ -х каскадів

$$D_{i1}^* = \sqrt[3]{n_i D_{i1}}; \quad D_{i2}^* = \sqrt{n_i D_{i2}}. \quad (10)$$

У більш загальному випадку, коли динамічні діапазони каскадів радіоприймального тракту не рівні між собою і (або) не рівні динамічному діапазону вхідних дій, необхідний ступінь зменшення нелінійної передавальної функції третього порядку  $i$ -го каскаду може бути знайдений з формули [3]

$$\eta_i = r_i n_i, \quad (11)$$

де  $r_1 = \left[ \frac{D_{\text{вх}}}{D_{i1}} \right]^3$ ,  $r_2 = \left[ \frac{D_{\text{вх}}}{D_{i2}} \right]^2$ ,  $r_i = r_{i1}, r_{i2}$ .

Отримані вище результати застосовні не тільки до підсилювальних каскадів, але і до таких радіопристроїв, корисна складова вхідного сигналу яких визначається НПФ  $K$ -го ( $K = 2,3,\dots$ ) порядку [4, 5].

Для цього необхідно представити дані радіопристрої у вигляді "еквівалентного підсилювача" [3, 4]. При цьому

$$\begin{cases} H_k(\cdot) \doteq H_{1\text{ЭКВ}}(\cdot); \\ H_{k+2}(\cdot) \doteq H_{3\text{ЭКВ}}(\cdot). \end{cases} \quad (12)$$

Потім з  $H_{1\text{ЭКВ}}(\cdot)$  і  $H_{3\text{ЭКВ}}(\cdot)$  слід оперувати як із звичайними НПФ першого і третього порядку, відповідно [3]. При виведенні формул (10) ÷ (12) вважалось, що смуги пропускання по входу і виходу КВС рівні [4]. Проте для реальних КВС РТК це умова, в загальному випадку, не виконується [1]. Тому досліджуємо багатокаскадні РТК з урахуванням відмінності параметрів частотної вибірконості окремих каскадів [3].

Для цього необхідно визначити загальну "вагу" складових інтермодуляційних і перехресних спотворень на частотах  $f'$  і  $f''$ , відповідно

$$Y_1(f') = \int_{\Delta f_{\text{вх}}} \int_{\Delta f_{\text{вх}}} \int_{\Delta f_{\text{вх}}} \left| H_3(f_1, f_2, -f_3) X(f_1) \times X(f_2) X(-f_3) \right| df_1 df_2 df_3; \quad (13)$$

$$Y_2(f'') = \int_{\Delta f_{\text{вих}}} \int_{\Delta f_{\text{вих}}} \int_{\Delta f_{\text{вих}}} \left| H_3(f, f_1, -f_2) \times S(f) X(f_1) X(-f_2) \right| df df_1 df_2, \quad (14)$$

де  $X(\cdot) = S(\cdot) + M(\cdot)$ ,  $S(\cdot)$ ,  $M(\cdot)$  – перетворення Фур'є вхідної дії інформаційного сигналу і перешкоди, відповідно.

Порівнюючи досліджуване РТК з ідеальним, яке не чутливе до сигналів, що заважають, поза смугою частот  $\Delta f_{\text{ид}} \leq \Delta f_{\text{вих}}$ , з формул (10) і (12) можна знайти наступні вимоги до ширини динамічного діапазону реального РТК [3, 5]

$$d_1(f') = \sqrt[3]{\frac{Y_1(f')}{Y_{1\text{ид}}(f')}}; \quad (15)$$

$$d_2(f'') = \sqrt{\frac{Y_2(f'')}{Y_{2\text{ид}}(f'')}}; \quad (16)$$

де  $d_1$ ,  $d_2$  – коефіцієнти, що визначають необхідний ступінь розширення динамічного діапазону РТК по інтермодуляційних і перехресних спотвореннях і залежні від параметрів його частотної вибірконості і характеристик вхідних дій.

Звідси можна отримати вираз для визначення інтегральних вимог до ширини динамічного діапазону довільного  $i$ -го ( $i=1,2,\dots,m$ ) каскаду РТК [3, 5]

$$D_{i1\Sigma} = D_{i1} \sqrt[3]{n_{i1}} \sqrt[3]{\eta_{i1} d_{i1}}; \quad (17)$$

$$D_{i2\Sigma} = D_{i2} \sqrt{n_{i1}} \sqrt{\eta_{i1} d_{i2}}. \quad (18)$$

Тоді інтегральна вимога до ступеня зміни НПФ третього порядку  $i$ -го каскаду РТК можна знайти з наступної формули

$$\left| H_{i3}(f_1, f_2, -f_3) \right|' = \frac{H_{i3}(f_1, f_2, -f_3)}{n_i \eta_i (d_i)^3}, \quad (19)$$

де  $\{H_{i3}(\cdot)\}'$ ,  $H_{i3}(\cdot)$  – потрібна і початкова НПФ третього порядку і-го каскаду РТК

$$n_i = n_{i1}, n_{i2}; \eta_i = \eta_{i1}, \eta_{i2}; d_i = d_{i1}, d_{i2}.$$

Розглянемо окремий випадок, коли вхідні дії в смузі пропускання по входу РТК мають рівномірну спектральну щільність, а НПФ  $H_3(\cdot)$  істотно не змінюється в межах того ж діапазону частоти рівна НПФ  $H_{3ид}(\cdot)$ . Тоді з формул (13) і (14) можна отримати

$$\frac{Y_1(f')}{Y_{ид}(f')} \cong \left( \frac{\Delta f_{вх}}{\Delta f_{ид}} \right)^3; \quad (20)$$

$$\frac{Y_2(f'')}{Y_{ид}(f'')} \cong \frac{\Delta f_{вх}^2 \Delta f_{вых}}{\Delta f_{ид}^3}. \quad (21)$$

Оскільки вирази (20) і (21) отримані з найбільш складних умов функціонування РТК, вони можуть служити основою при розробці мажоритарних вимог до ширини динамічного діапазону його каскадів. Тоді з урахуванням співвідношень (17), (18), (20) і (21) отримуємо [3, 5]:

$$D_{i1max} = 20 \lg D_{i1} + 20 \lg \sqrt[3]{m} + 20 \lg \left[ \frac{D_{вх}}{D_{i1}} \right] + 20 \lg \left[ \frac{\Delta f_{вхi}}{\Delta f_{ид}} \right]; \quad (22)$$

$$D_{i2max} = 20 \lg D_{i2} + 20 \lg \sqrt{m} + 20 \lg \left[ \frac{D_{вх}}{D_{i2}} \right] + 20 \lg \sqrt[3]{\frac{\Delta f_{вхi}^2 \Delta f_{вых}}{\Delta f_{ид}}}; \quad (23)$$

де  $D_{i1max}$ ,  $D_{i2max}$  – мажоритарна ширина динамічного діапазону і-го каскаду РТК по інтермодуляційних і перехресних спотвореннях.

Отже, мажоритарний ступінь зміни НПФ третього порядку і-го каскаду РТК може бути знайдений з наступного виразу

$$|H_{i3}(f_1, f_2, -f_3)|_{max} = \frac{|H_{i3}(f_1, f_2, -f_3)|}{m \eta_i \left[ \Delta f_{вхi} / \Delta f_{ид} \right]^3}, \quad (24)$$

де  $\{H_{i3}(\cdot)\}_{max}$  – НПФ третього порядку j-го каскаду РТК, відповідна мажоритарній ширині його динамічного діапазону.

## Висновки

Таким чином, отримані аналітичні співвідношення дозволяють знаходити інтегральні умови узгодження КВС РТК з динамічним діапазоном вхідних дій тільки після докладного аналізу впливу нелінійних процесів в КВС на перешкодостійкість РТК [1, 5, 6].

## Список літератури

1. Козелков С.В. Системы наведения и автоспроваждения антенных устройств радиолоний СВЧ и КВЧ диапазонов / С.В. Козелков // Труды 10 НТК в/ч 32103. Научно-практические аспекты управления космической и наземной группировками, особенности их применения / – МО СССР, 1989. – 223 с.
2. Иванов М.А. Некоторые вопросы исследования нелинейных процессов в системах с помощью функциональных рядов Вольтерра / М.А. Иванов // Мат-лы семинара “Нелинейные эффекты в радиоприемных и усилительных устройствах”; НТОРЭС им. А.С. Попова. – М.: Радио и связь, 1979. – 150с.
3. Иванов М.А. Согласование многокаскадных частотно-избирательных радиоприемных устройств с входными воздействиями / М.А. Иванов // Радиотехника: республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Х., 1983. – Вып. 65. – С. 70-73.
4. Справочник по математике для научных работников и инженеров / под ред. Г. Корн и Т. Корн – М.: Наука, 1984. – 831 с.
5. Богданович Б.М. Проектирование приемно-усилительных устройств на микросхемах / Б.М. Богданович. – Минск: Вышэйшая школа, 1979. – 189 с.
6. Козелков С.В. Разработка научно-технических предложений по повышению помехоустойчивости антенно-приемных устройств ракетно-космических комплексов: дис. ... канд. техн. наук: 20.02.14. – Х., 1991. – 187с.

Надійшла до редколегії 10.11.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В РАДИОЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ

Е.С. Козелкова

Рассмотрен вопрос исследования нелинейных искажений в радиолониях передачи информации комплекса управления КА. Полученные аналитические соотношения позволяют находить интегральные условия согласования командно измерительной системы радиотехнического комплекса с динамическим диапазоном входных действий.

**Ключевые слова:** антенно-приемное устройство, космический аппарат, радиотехнический комплекс.

## RESEARCH OF NONLINEAR DISTORTIONS IN RADIOLINIYAKH OF INFORMATION OF COMPLEX TRANSFER SPACE VEHICLE

E.S. Kozelkova

The question of research of nonlinear distortions is considered in radioliniyakh of information of management complex transfer space vehicle. The got analytical correlations allow to find the integral terms of concordance command of the measuring system of radio engineering complex with the dynamic range of entrance actions.

**Keywords:** aerial-receiving device, space vehicle, radio engineering complex.