

## **ДИНАМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ НЕЛІНІЙНИХ РОЗСІЮВАЧІВ ПІД ЧАС ЗОНДУВАННЯ**

*Зінченко М. В., аспірант*

*Зіньковський Ю. Ф., д.т.н., професор*

*Національний технічний університет України*

*"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

У нелінійній радіолокації можлива ідентифікація нелінійних розсіювачів (НРс) за другорядними ознаками. Це пов'язано зі спотворенням ВАХ кремнієвих напівпровідникових структур під час зондування нелінійним радіолокатором. На ВАХ з'являється ділянка з негативним диференціальним опором, що пов'язано з ефектом розігріву вільних носіїв заряду та детекторним ефектом [10]. Проведені дослідження показали, що НРс під час зондування нелінійним радіолокатором представляють випадкові генератори, які згідно теорії [1, 9] здатні генерувати квазігармонічні сигнали. Але згідно проведених експериментів, реальні НРс завдяки наявності елементів з інерційними властивостями генерують не квазігармонічні, а так звані хаотичні коливання.

Як відомо, під детермінованим хаосом розуміється складний неперіодичний рух, породжуваний нелінійними динамічними системами. Цей рух може виникати при повній відсутності зовнішніх шумів і повністю визначається властивостями самої детермінованої динамічної системи (ДС). Динамічний хаос має чимало властивостей випадкових процесів, наприклад, суцільний спектр, експоненціально спадаючу автокореляційну функцію, непередбачуваність на великі інтервали часу.

Системи з детермінованим хаосом мають у фазовому просторі збіжні множини (атрактори), де фазові траєкторії як би збираються в єдине русло. Траєкторії хаотичних систем надзвичайно чутливі до початкових умов. У той же час самі коливальні режими джерел хаосу демонструють багатство різноманітності при зміні параметрів системи. Причому, якщо кількість істотних параметрів у системі зростає, то це, як правило, призводить до збільшення різноманітності динамічних режимів. Різноманітність хаотичних режимів може зростати також зі збільшенням розмірності динамічної системи.

Еквівалентна схема типового НРс при зондуванні засобами нелінійної радіолокації представлена на рис. 1. На даному рисунку  $Y_D$  відповідає вхідній провідності напівпровідникової структури в НРс при дії відносно потужного зондуємого сигналу нелінійного радіолокатора, а інші елементи моделюють антенну структуру, на яку безпосередньо навантажений напів-

провідник.

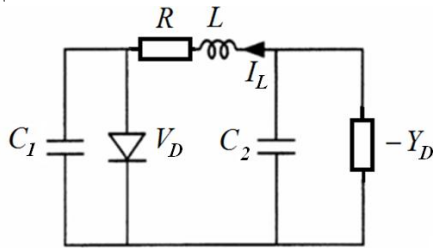


Рис. 1.

Еквівалентна схема генератора хаотичних коливань на базі  $p$ - $n$  переходу з негативним диференціальним опором

Схема на рис. 1 була отримана за допомогою розв'язку задачі реконструкції динамічних систем, що перебувають під зовнішнім впливом. Тому актуальним стає питання адекватності отриманої моделі фізичним реаліям. Чи можливо на основі експериментальних даних відтворити типову еквівалентну схему випадкового генератора хаотичних коливань?

Розглянемо послідовність розв'язку задачі реконструкції шляхом чисельного диференціювання. Задача реконструкції динамічних систем, що перебувають під зовнішнім впливом, виникає при відновленні перевипромененого хаотичного сигналу нелінійними розсіювачами [4, 12].

Спочатку необхідно привести вихідну систему диференціальних рівнянь, що описують відповідну ДС, до виду

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \frac{dx_2}{dt} = x_3, \dots, \frac{dx_N}{dt} = f(x_1, \dots, x_N).$$

Функція  $f$  представляється у вигляді полінома порядку  $K$ . Крім стандартного базису  $1, x_1, x_1^2, x_1x_2, \dots$  апроксимація нелінійності може здійснюватися розкладанням за будь-яким набором ортогональних базисних функцій (поліноми Лежандра, Чебишева, Ерміта, Лагерра).

Шляхом розв'язку системи з  $K$  алгебраїчних рівнянь методом найменших квадратів, для  $Q$  невідомих  $Q \ll K$  можливо здійснити апроксимацію невідомих коефіцієнтів. Основною проблемою методів глобальної реконструкції є вибір нелінійних функцій  $f$  у правих частинах модельних рівнянь. Якщо використовується метод послідовного диференціювання для завдання координат вектора стану, то математична модель буде містити тільки одну відому функцію.

Інша проблема полягає в необхідності роботи з зашумленими експериментальними даними при обробці сигналів. З одного боку, більш бажаним є використання методу послідовного диференціювання для відновлення вихідних систем і породжуваних ними сигналів, оскільки при цьому можна одержати модель, що містить у загальному випадку в  $n$  раз менше коефіцієнтів при різних нелінійностях, ніж при використанні затримки. Але диференціювання неминуче буде призводити до посилення шумового компонента в похідних високого порядку. Без попередньої фільтрації вже друга похідна може призвести до неприпустимого рівня зашумлення. Крім

того, традиційні методи мають істотні недоліки при аналізі суттєво неоднорідних реалізацій, тобто сигналів, у яких ділянки зі швидким рухом чергуються з ділянками з повільним рухом.

Одним з перспективних методів відновлення параметрів нелінійних динамічних систем є метод власних координат (МВК), запропонований Нігматуліним Р.Р. [2, 3] при реконструкції генеруючих систем за експериментальними даними різної природи. Цей метод дозволяє перетворити функції  $y(x, V)$  ( $x$  – незалежна змінна,  $V$  – вихідний вектор параметрів, що входять у рівняння в загальному випадку нелінійно) у співвідношення виду [8]:

$$Y(x) = C_1(V)X_1(x) + \dots + C_k(V)X_k(x), \quad (1)$$

що представляє собою адитивну суміш нових змінних – власних координат  $X_1(x), \dots, X_k(x)$ , співставлених з нелінійно перетвореними параметрами  $C_1(V), \dots, C_k(V)$ . Співвідношення (1) дає можливість оцінити вихідні параметри  $V$  по реалізаціях процесів, породжуваних нелійними системами, не прибігаючи до аналітичного розв'язку вихідних систем нелінійних диференціальних рівнянь. Оцінка параметрів нелінійних систем за методом власних координат проводиться шляхом перетворення диференціальних рівнянь в інтегральні з наступним оригінальним застосуванням процедури лінійної регресії. Істотний вплив на характеристики сигналів, сформованих на основі нелінійних систем з динамічним хаосом, спричиняє величина кроку тимчасової дискретизації. Оцінка зміни кроку тимчасової дискретизації  $\Delta t$  з метою врахування тривалості квазірезонансних коливань близько станів рівноваги динамічних систем повинна проводитися за допомогою параметра  $K$ , який відповідно до [7]:  $K = T_1/\Delta t$ , де  $T_1$  – період квазірезонансних коливань динамічних систем. Зменшення величини  $K$  за рахунок збільшення кроку тимчасової дискретизації  $\Delta t$  призводить до зміни статистичних характеристик сигналів, сформованих на основі нелінійних систем з динамічним хаосом. Прагнення до зниження  $K$  вимагає оцінки граничних значень цього параметра. Тому необхідним є оцінка мінімального значення параметра чисельного інтегрування  $K = K_{\min}$ . При  $K < K_{\min}$  відбувається переповнення відповідних змінних, тому фазова траєкторія виходить за межі обмеженої області фазового простору, займаної дивним атрактором нелінійної системи з динамічним хаосом.

При відповідному спрощенні еквівалентної схеми на рис.1 отримаємо відому систему Чуа (рис. 2), яка також описує динаміку випадкового генератора, що породжує хаотичні коливання. Вона містить три реактивні елементи (мінімальне число елементів, які необхідні для того, щоб динамічна

система стала хаотичною) і один нелінійний елемент найпростішого типу, а саме нелінійний двополюсник з кусочно-лінійною характеристикою.

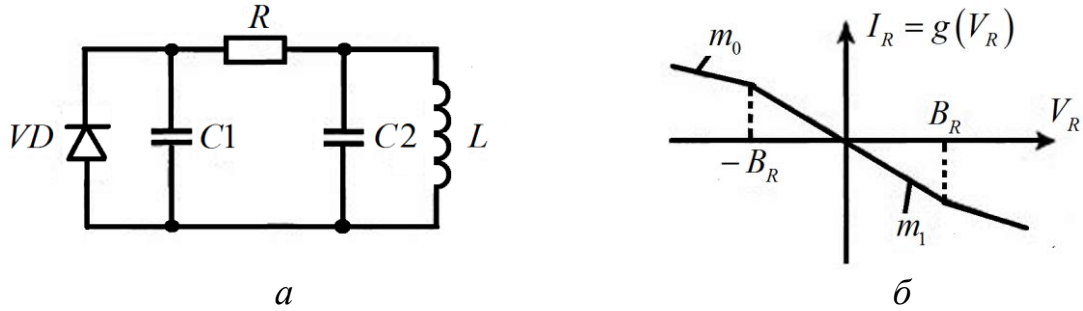


Рис. 2. Система Чуа: а - структурна схема, б - один з варіантів апроксимації ВАХ

Динаміка схеми на рис. 2, а описується системою нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} C1 \frac{dV_{C1}}{dt} &= G(V_{C1} - V_{C2}) - i_{VD}(V_{C1}), \\ C2 \frac{dV_{C2}}{dt} &= G(V_{C1} - V_{C2}) + i_L, \quad L \frac{di_L}{dt} = -V_{C2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $V_{C1}$ ,  $V_{C2}$ ,  $i_L$  – напруги на конденсаторах  $C1$ ,  $C2$  і струм через котушку  $L$ ,  $G = 1/R$ .

Запишемо рівняння (2) у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \frac{1}{RC1}(Y - X) - \frac{g(X)}{C1}, \\ \frac{dY}{dt} &= \frac{1}{RC2}(Y - X) + \frac{g(X)}{C2}, \\ \frac{dZ}{dt} &= -\frac{Y}{L}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $g(u) = m_0 u + \frac{1}{2}(m_1 - m_0)(|u + B_R| - |u - B_R|)$ , ( $m_0 = -0.5$ ,  $m_1 = -0.8$ ,  $|B_R| = 1$ ) описує нелінійний елемент (рис. 2, б),  $X = V_{C1}/B_R$ ,  $Y = V_{C2}/B_R$ ,  $Z = i_L/(BG)$ .

Якщо скористатися співвідношеннями:

$$a = m_1/G + 1, \quad b = m_0/G + 1, \quad \alpha = C2/C1, \quad \beta = C2/(LG^2)$$

то рівняння (3) запишуться у вигляді [11]

$$\frac{dX}{dt} = \alpha(Y - h(X)), \quad \frac{dY}{dt} = X - Y + Z, \quad \frac{dZ}{dt} = -\beta Y, \quad (4)$$

де кусочно-лінійна апроксимація ВАХ має вигляд

$$h(X) = \begin{cases} bX + a - b, & X \geq 1, \\ aX, & |X| \leq 1, \\ bX - a + b, & X \leq -1. \end{cases}$$

У нелінійній динамічній системі Чуа зміна параметрів  $\alpha$ ,  $\beta$  впливає на її динаміку. Тому при аналізі системи як правило будуються двопараметричні біфуркаційні діаграми, що показують зміну поведінки системи при варіаціях параметрів  $\alpha$  і  $\beta$ .

У системі Чуа існують три точки рівноваги: на початку координат  $(0,0,0)$ , а також точки

$$X_{02} = \pm k, \quad Y_{02} = 0, \quad Z_{01} = \mp k, \quad k = (b-a)/(b+1)$$

Початок координат  $(0,0,0)$  для будь-яких  $\alpha > 0$  (при фіксованому  $\beta$ ) відповідає хиткій рівновазі, стійкість точок  $(\pm k, 0, \mp k)$  залежить від поточних значень параметрів  $\alpha$ ,  $\beta$  [11].

Виділимо в системі Чуа дві характерні області в околиці точок рівноваги:  $P_{1,2}(\pm k, 0, \mp k)$  і  $P_0(0,0,0)$ . При русі зображуючої точки поблизу станів рівноваги, система диференціальних рівнянь, що описують динаміку схеми Чуа, зводиться до лінійної однорідної системи диференціальних рівнянь. Виразивши одні змінні системи через інші:

$$y = -\frac{1}{\beta} \frac{dz}{dt}, \quad x = -\frac{1}{\beta} \frac{d^2z}{dt^2} - \frac{1}{\beta} \frac{dz}{dt} - z,$$

одержимо із системи (4), при розгляді руху зображуючої точки поблизу станів  $P_{1,2}$ , диференціальне рівняння третього порядку

$$-\frac{1}{\beta} \frac{d^3z}{dt^3} - \frac{1}{\beta} \frac{d^2z}{dt^2} - \frac{dz}{dt} = -\frac{\alpha}{\beta} \frac{dz}{dt} - \alpha b \left[ -\frac{1}{\beta} \frac{d^2z}{dt^2} - \frac{1}{\beta} \frac{dz}{dt} - z \right] - \alpha(b-a), \quad (5)$$

Приведемо подібні члени в рівнянні (5) і помножимо його на  $-\beta$

$$\frac{d^3z}{dt^3} + (1+\alpha b) \frac{d^2z}{dt^2} + (\beta - \alpha + \alpha b) \frac{dz}{dt} + \alpha\beta b z + \alpha(b-a) = 0, \quad (6)$$

визначимо характеристичне рівняння у вигляді

$$\lambda^3 + (1+\alpha b)\lambda^2 + (\beta - \alpha + \alpha b)\lambda + \alpha\beta b = 0,$$

після вирішення останнього одержимо три корені

$$\lambda_1 = A_1, \quad \lambda_{2,3} = A_{2,3} \pm jB_{2,3}.$$

В околиці точки рівноваги  $P_0$  рівняння запишеться у вигляді

$$\frac{d^3 z}{dt^3} + (1 + \alpha a) \frac{d^2 z}{dt^2} + (\beta - \alpha + \alpha a) \frac{dz}{dt} + \alpha \beta a z = 0. \quad (7)$$

Рівняння (7) має три корені: дійсний  $\lambda_1 = A_1$  і два комплексно-спряжені корені  $\lambda_{2,3} = A_{2,3} \pm jB_{2,3}$ . При  $\alpha = 9.8$ ,  $\beta = 110/7$ ,  $a = -1/7$  одержимо корені  $\lambda_1 = 2.38$  та  $\lambda_{2,3} = -0.99 \pm 2.87j$ .

Загальний розв'язок рівнянь (6), (7) має вигляд

$$z(t) = D_1 z_1(t) + D_2 z_2(t) + D_3 z_3(t),$$

де  $D_i$  – постійні,  $i = \overline{1,3}$ ,  $z_1(t) = \exp(A_1 t)$ ,  $z_2(t) = \exp(A_2 t) \cdot \sin(B_2 t)$ ,  $z_3(t) = \exp(A_3 t) \cdot \cos(B_3 t)$ .

Використовуючи перетворення Фур'є, одержимо вирази для спектрів розв'язків рівнянь (6), (7) при русі поблизу станів рівноваги  $P_0$ ,  $P_{1,2}$

$$Z(\omega) = z_1(\omega) + z_2(\omega) + z_3(\omega), \quad (8)$$

де

$$\begin{aligned} z_1(\omega) &= \frac{-1}{(-A_1 + j\omega)} \cdot \exp[-T(-A_1 + j\omega)] + \frac{-1}{(-A_1 + j\omega)}, \\ z_2(\omega) &= \frac{-B_2 \cos(TB_2) + A_2 \sin(TB_2) - j\omega \sin(TB_2)}{(A_2 - j\omega)^2 - B_2^2} \times \\ &\quad \times \exp[T(A_2 - j\omega)] + \frac{B_2}{(A_2 - jB_2)^2 + B_2^2}, \\ z_3(\omega) &= \frac{-B_3 \sin(TB_3) - A_3 \cos(TB_3) + j\omega \cos(TB_3)}{-(A_3 - j\omega)^2 - B_3^2} \times \\ &\quad \times \exp[T(A_3 - j\omega)] + \frac{(A_3 - jB_3)}{(A_3 - jB_3)^2 + B_3^2}. \end{aligned}$$

На рис. 3 приведені спектри розв'язків лінійаризованої системи Чуа.

Залежності, приведені на рис. 3, дозволяють визначити верхню граничну частоту сигналу за рівнем  $\omega_H = 34.1$ . При цьому мінімальне значення  $K_{\min H} = B_2 \omega_H / \pi = 38.8$ .

Таким чином, параметр чисельного інтегрування при формуванні хаотичних сигналів повинен вибиратися в межах

$$K_{\min} < K < K_{\max}, \quad (9)$$

де  $K_{\min}$  – мінімальне значення  $K$ , яке відповідає максимальному кроку дискретизації за часом, воно визначається за співвідношенням (8) для сис-

теми Чуа;  $K_{\max}$  – максимальне значення  $K$ , визначається згідно [5].

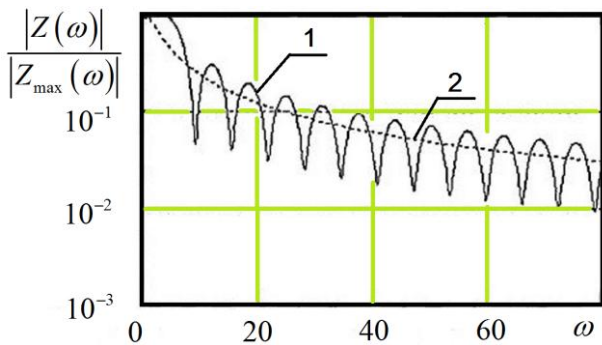


Рис. 3.  
Спектри розв'язків лінійаризованої системи Чуа при  $\alpha = 9.8$ ,  $\beta = 110/7$  :  
1 – при русі поблизу  $P_{1,2}$ ,  
2 – при русі поблизу  $P_0$ .

Варіація параметрів чисельного інтегрування в межах (9) призводить до істотних змін у сигналах, сформованих на основі нелінійних ДС, та структури фазового простору ДС.

На відміну від методів «глобальної» реконструкції, метою яких є відновлення ДС по одномірній тимчасовій реалізації, метод власних координат дозволяє відновити параметри тільки відомої ДС. Перевагою даного методу є можливість відновлення параметрів нелінійної ДС при комплексному впливі як низькочастотних, так і високочастотних адитивних і мультиплікативних шумів. Цей метод може бути використаний у якості тесту на можливість відновлення параметрів генеруючої системи по реалізаціях сигналів. МВК є мірою стійкості сигналів системи до відновлення. Тому необхідно визначити можливості практичного застосування даного методу для відновлення параметрів нелінійних систем з динамічним хаосом.

Для аналізу ефективності МВК була запропонована процедура, заснована на методі чисельного інтегрування систем диференціальних рівнянь Ейлера (ПЕ).

Необхідно відзначити, застосування МВК і ПЕ для аналізу сигналів, породжуваних системами з динамічним хаосом, дозволяє зробити висновки про ступінь можливості відновлення параметрів генераторів хаосу по реалізаціях їх сигналів. Незважаючи на розвиток методів реконструкції, важливими є дослідження впливу шумів, флуктуацій, що присутні у будь-якій реальній системі, на похибку відновлення параметрів систем по реалізаціях сигналів.

Необхідним є зіставлення відносних похибок відновлення параметрів по тимчасових реалізаціях різної тривалості нелінійної ДС Чуа при впливі шумів двома методами: власних координат і на основі чисельної процедури Ейлера (ПЕ). Чисельний розв'язок системи Чуа проведений з використанням процедури Ейлера при значенні параметрів системи  $\alpha = 9.8$ ,  $\beta = 110/7$  та кроці чисельного інтегрування  $\Delta t = 0.01$  ( $K = T_{\text{кол}} / \Delta t = 200$ ). При цьому параметри ВАХ  $a$ ,  $b$  і сам її вид вважа-

ються апріорно відомими.

Оцінка апріорно невідомих параметрів системи  $\alpha$ ,  $\beta$  проводиться за допомогою методу власних координат, а також за процедурою Ейлера [5].

Залежності відносних похибок відновлення параметрів  $\delta_\alpha$ ,  $\delta_\beta$  системи Чуа при варіації відносних середньоквадратичних значень шумів до рівнів  $X_{02}$ ,  $Z_{02}$ :  $\sigma/(X_{02})$ ,  $\sigma/(Z_{02}) \in [10^{-5}, 10^{-1}]$  визначалися для різної кількості переходів  $P$  між станами рівноваги.

На рис. 4 приведені зазначені залежності для  $P < 1$ .

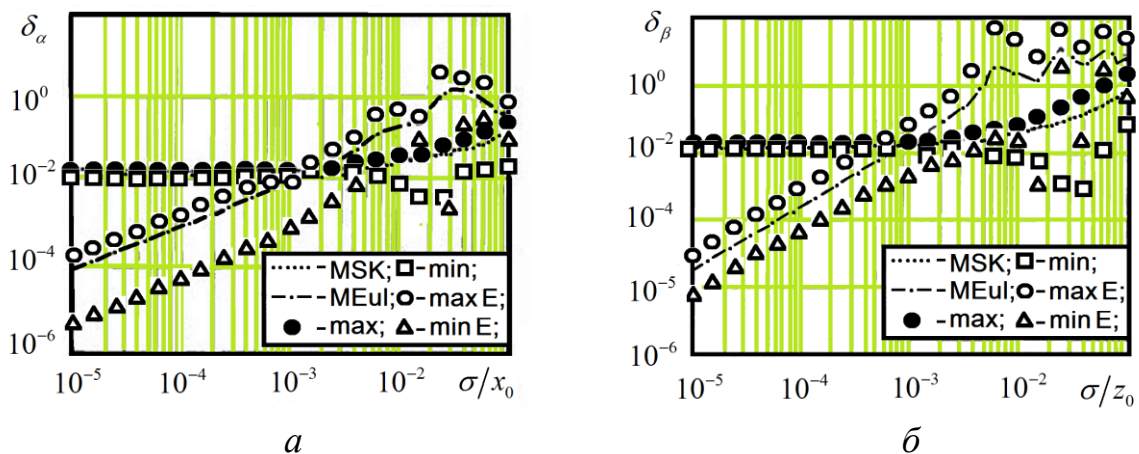


Рис. 4. Залежність від  $\sigma_A/(X_{02}, Z_{02})$  відносної похибки оцінки параметрів системи Чуа:  $a$  – параметр  $\alpha$ ,  $b$  – параметр  $\beta$ ,  $P < 1$ .

З рис. 4 видно, що за допомогою МК, незважаючи на варіацію рівня шумів  $\sigma_A/(X_{02}, Z_{02})$  від  $10^{-5}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$ , похибки оцінок параметрів рівні  $\delta_{\alpha, \beta} \approx 10^{-2}$  для всіх використовуваних реалізацій шумів.

Отже, при малому числі переходів між станами рівноваги, похибка оцінки параметрів системи обумовлена, насамперед, малою тривалістю реалізації та слабо залежить від рівня діючих шумів.

Для відносно великого рівня шумів  $\sigma/(X_{02}) > 2 \cdot 10^{-3}$  і  $\sigma/(Z_{02}) > 1 \cdot 10^{-3}$ , більш точні оцінки параметрів системи виходять при використанні МК.

Число переходів  $P$  фазової траєкторії ДС Чуа між різними станами рівноваги визначає довжину реалізації, по якій оцінюються параметри системи.

На рис. 5 приведені залежності  $\delta_\alpha$ ,  $\delta_\beta$  для  $P = 10$  [5].



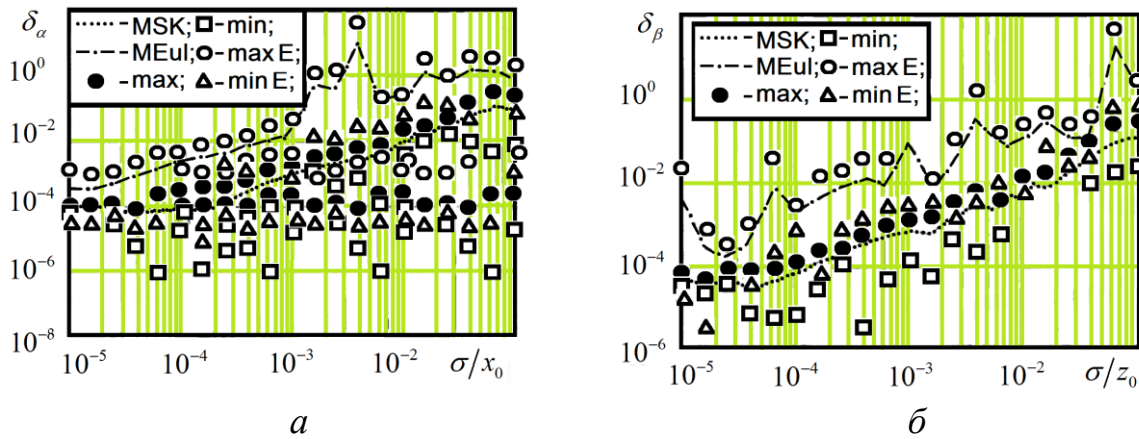


Рис. 5. Залежність від  $\sigma_A/(X_{02}, Z_{02})$  відносної похибки оцінки параметрів системи Чуа:  $a$  – параметр  $\alpha$ ,  $b$  – параметр  $\beta$ ,  $P = 10$ .

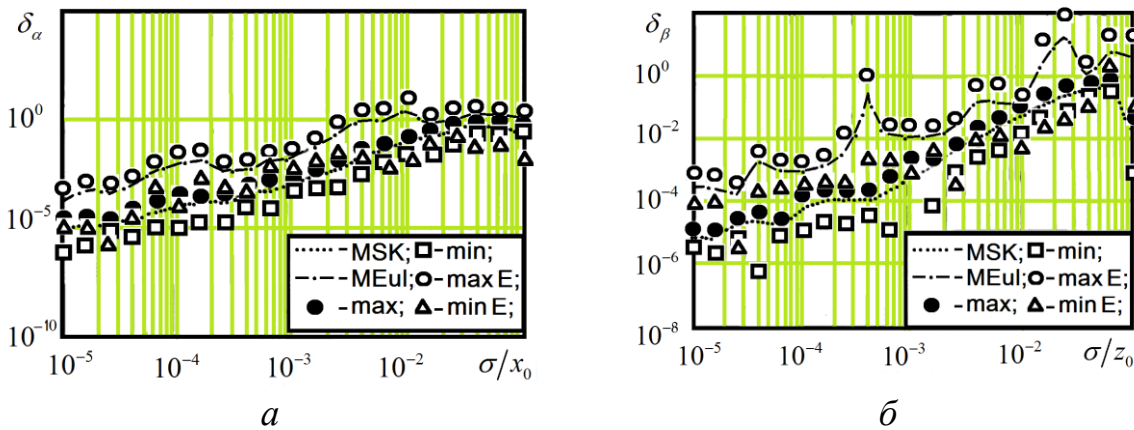


Рис. 6. Залежність відносної похибки оцінки  $\sigma_A/(X_{02}, Z_{02})$  параметрів системи Чуа:  $a$  – параметр  $\alpha$ ,  $b$  – параметр  $\beta$ ,  $P = 200$ .

З рис. 5 видно, що незважаючи на варіацію рівня шумів  $\sigma_A/(X_{02}, Z_{02})$  від  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$ , отримані близькі значення похибок оцінок  $\delta_{\alpha, \beta} \approx 10^{-4}$ .

На відміну від випадку  $P < 1$ , ця залежність похибок оцінок параметрів від рівня шумів отримана при його зміні у відносно менших межах.

При відновленні параметрів  $\alpha$  і  $\beta$ , МВК забезпечує приблизно на порядок менші похибки оцінок параметрів ДС у порівнянні з ПЕ у всьому аналізованому діапазоні зміни шумів.

Похибки оцінки параметрів  $\alpha$  і  $\beta$  для  $P = 10$  за допомогою МВК (рис. 5) нижче тієї, що отримано для  $P < 1$  (рис. 4).

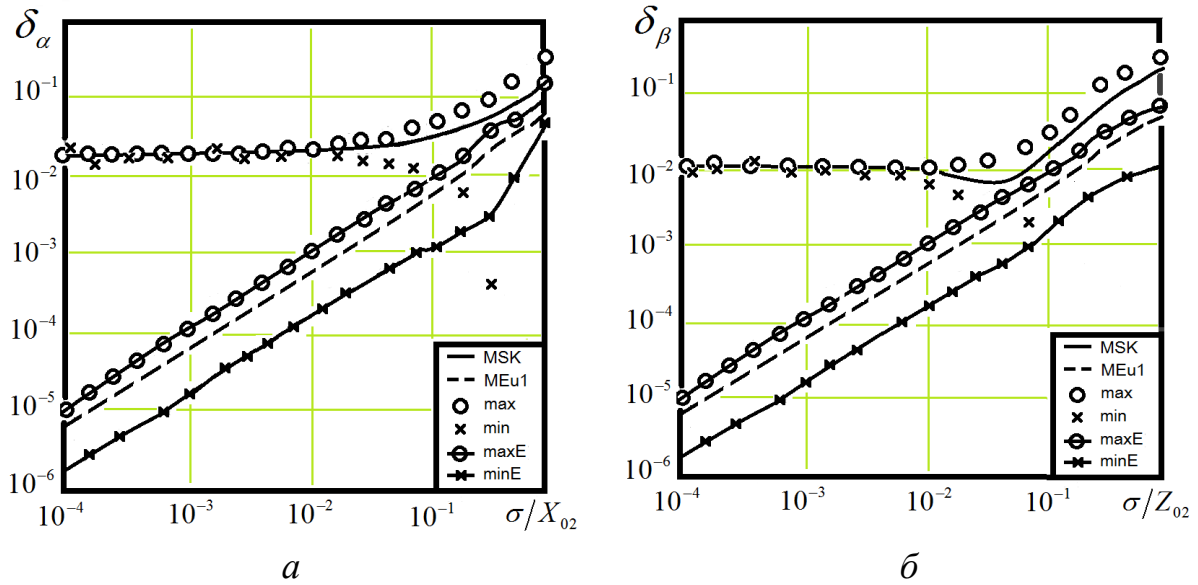


Рис. 7. Залежність від  $\sigma_M / (X_{02}, Z_{02})$  відносної похибки оцінки параметрів системи Чуа:  $a$  – параметр  $\alpha$ ,  $b$  – параметр  $\beta$ ,  $P < 1$ .

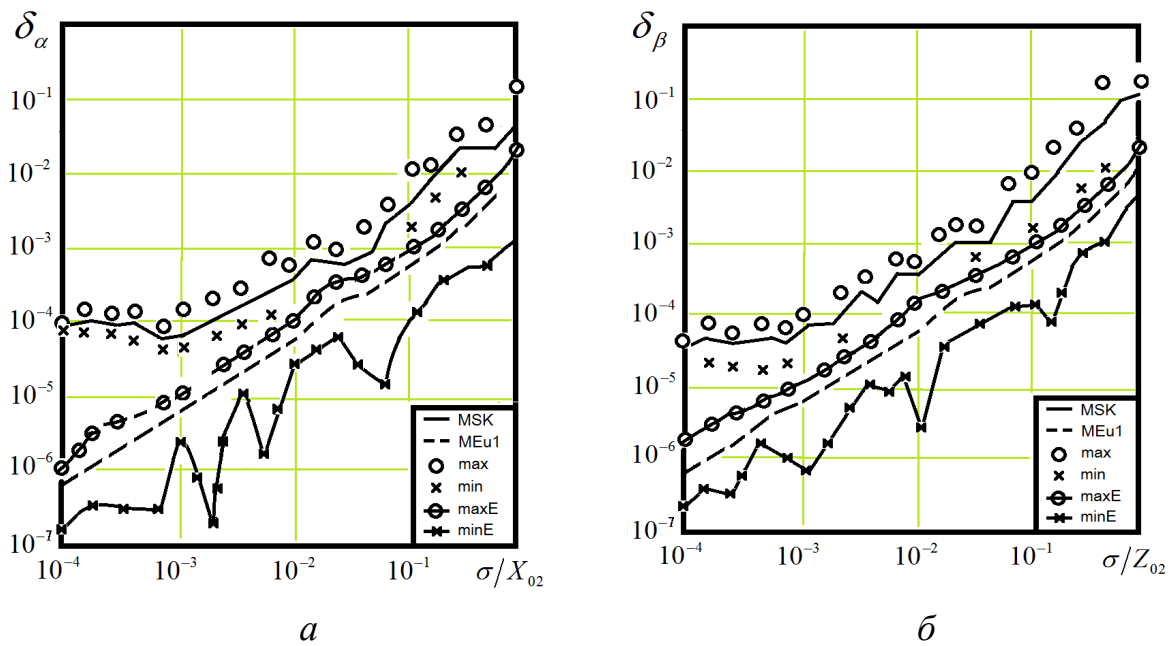


Рис. 8. Залежність від  $\sigma_M / (X_{02}, Z_{02})$  відносної похибки оцінки параметрів системи Чуа:  $a$  – параметр  $\alpha$ ,  $b$  – параметр  $\beta$ ,  $P = 10$ .

Залежності відносної похибки оцінки параметрів  $\delta_\alpha$ ,  $\delta_\beta$  від інтенсивності шумів при  $P = 200$  представлені на рис. 6.

На відміну від залежностей з рис. 4, 5, на залежностях  $\delta_\alpha$ ,  $\delta_\beta$  при  $P = 200$  відсутні ділянки, на яких зміна інтенсивності шумів мало впливає на похибку оцінки параметрів ДС Чуа. Для малих інтенсивностей шумів

$\sigma/(X_{02}, Z_{02}) < 10^{-3}$  і  $P = 200$  похибки оцінки параметрів по МВК нижче, чим це було для менших довжин тимчасових реалізацій  $X, Y, Z$ . У випадку більших інтенсивностей шумів і  $P = 200$  похибки  $\delta_\alpha, \delta_\beta$  виявляються вище, чим на залежностях рис. 4, 5. Це викликане викривленням тимчасових реалізацій хаотичних сигналів для  $X, Y, Z$  високим рівнем адитивних шумів.

Виконаємо для системи Чуа дослідження впливу мультиплікативних шумів (відносно параметрів системи) на похибку відновлення методом власних координат та процедурою Ейлера. Шуми в рівняння системи вводилися по (3.9) [6].

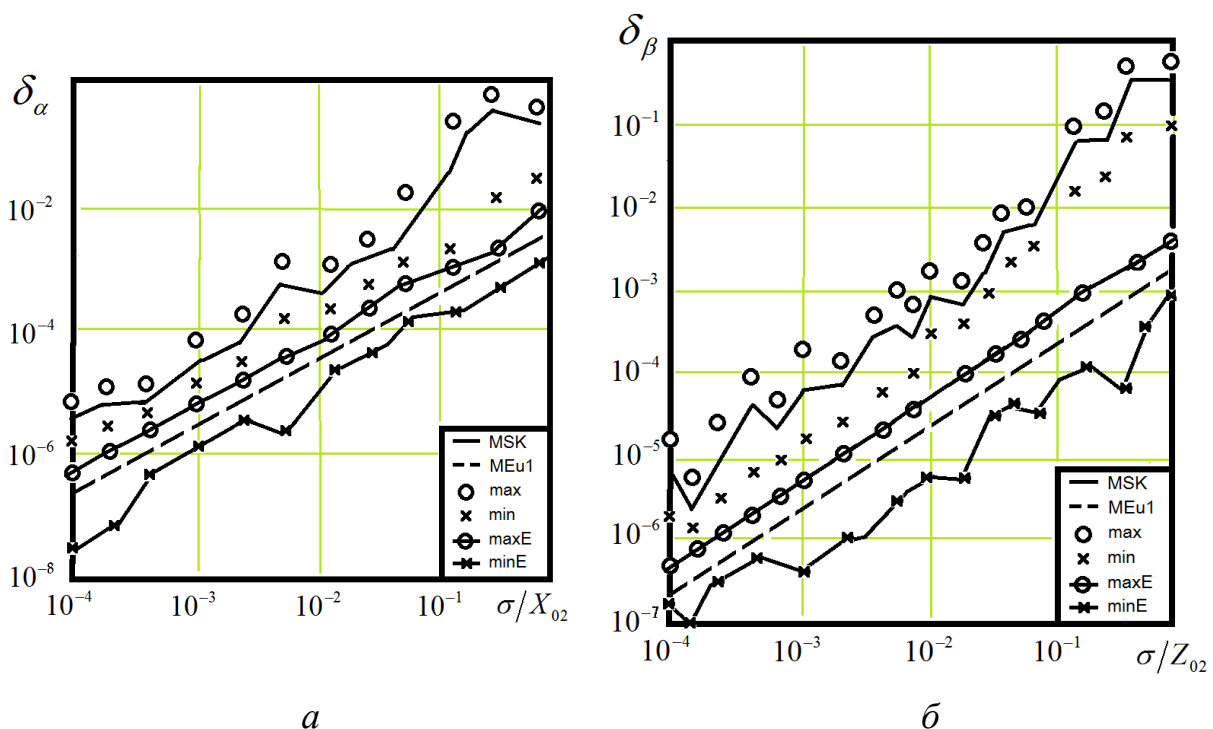


Рис. 9. Залежність від  $\sigma_M/(X_{02}, Z_{02})$  відносної похибки оцінки параметрів системи Чуа:  $a$  – параметр  $\alpha$ ,  $b$  – параметр  $\beta$ ,  $P = 200$ .

На рис. 7 – 9 показані залежності відносних похибок  $\delta_\alpha, \delta_\beta$  відновлення параметрів системи Чуа з динамічним хаосом від інтенсивності діючих шумів.

На рис. 7, який відповідає малій тривалості реалізацій сигналів  $P < 1$ , як і для адитивних шумів, присутні ділянки, де похибка відновлення параметрів приблизно постійна та не залежить від інтенсивності мультиплікативних шумів. При  $P < 1$  переважним засобом діагностики з відновленням параметрів системи Чуа є ПЕ. У випадку  $\sigma_M/Z_{02} \geq 10^{-1}$  похибки оцінки

параметра  $\beta$  МВК і ПЕ стають близькими. На відміну від адитивних шумів (рис. 4), перевага ПЕ у відновленні параметрів зберігається для будь-яких інтенсивностей  $\sigma/(X_{02}), \sigma/(Z_{02}) \in [10^{-5}, 10^{-1}]$ .

При збільшенні тривалості реалізації до величини, що відповідає  $P = 10$ , були отримані залежності, приведені на рис. 8.

На залежностях рис. 8 спостерігається зниження похибок відновлення параметрів системи Чуа за допомогою МВК і ПЕ. На відміну від рис. 5 при варіації рівнем мультиплікативних шумів перевага залишається за ПЕ. На рис. 9 приведені залежності похибок відновлення параметрів  $\alpha, \beta$  системи Чуа від інтенсивності мультиплікативних шумів.

З рис. 9 видно, що при збільшенні тривалості реалізації похибка відновлення параметрів  $\alpha, \beta$  знижується в порівнянні з рис. 7, 8. Перевага ПЕ в порівнянні з МВК росте, особливо при більших інтенсивностях шумів.

Спосіб використання методу власних координат для відновлення параметрів динамічної системи Чуа при впливі адитивних шумів ефективніший в порівнянні з ПЕ для  $P < 1$  при  $\sigma_A/(X_{02}, Z_{02}) > 3 \cdot 10^{-3}$ , для  $P = 10$ ,  $P = 200$  при  $\sigma_A/(X_{02}, Z_{02})$  від  $10^{-5}$  до  $10^{-1}$ . Збільшення числа переходів між різними станами рівноваги  $P$  призводить до зниження похибки оцінки параметрів методом власних координат у випадку  $\sigma_A/(X_{02}, Z_{02}) < 10^{-3}$ .

Отже, на відміну від методів «глобальної» реконструкції, метою яких є відновлення динамічних систем по одномірній тимчасовій реалізації, метод власних координат дозволяє відновити параметри тільки відомої ДС. Перевагою даного методу є можливість відновлення параметрів нелінійної ДС при комплексному впливі як низькочастотних, так і високочастотних адитивних і мультиплікативних шумів. Цей метод може бути використаний у якості тесту на можливість відновлення параметрів генеруючої системи по реалізаціях сигналів. І він є мірою стійкості сигналів системи до відновлення.

### **Висновки**

Нелінійні розсіювачі під час зондування нелінійним радіолокатором представляють випадкові генератори, що здатні генерувати завдяки наявності елементів з інерційними властивостями так звані хаотичні коливання. Основною проблемою методів глобальної реконструкції є вибір нелінійних функцій у відповідних частинах модельних рівнянь. Крім цього, паралельно існує проблема зашумлення експериментальних даних при обробці сигналів. Також слід враховувати істотний вплив на характеристики хаотичних сигналів, величини кроку тимчасової дискретизації.

На відміну від методів «глобальної» реконструкції, метою яких є відновлення динамічних систем (ДС) по одномірній тимчасовій реалізації,

метод власних координат дозволяє відновити параметри тільки відомої ДС. Перевагою даного методу є можливість відновлення параметрів нелінійної ДС при комплексному впливі як низькочастотних, так і високочастотних адитивних і мультиплікативних шумів. Цей метод може бути використаний у якості тесту на можливість відновлення параметрів генеруючої системи по реалізаціях сигналів, а також дозволяє визначити міру стійкості сигналів системи до відновлення.

### Література

1. Hilsum C, Transferred electron amplifiers and oscillators. Proc, IRE, V, 50, pp. 185-189, 1962.
2. Nigmatullin R. R. The quantified histograms: detection of the hidden unsteadiness. // Physica A 309 (2002). P. 214-230.
3. Nigmatullin R. R., Smith G. Fluctuation-noise spectroscopy and "universal" fitting function of amplitudes of random sequences // Physica A 320 (2003). P. 291-317.
4. Анищенко В. С., Павлов А. Н., Янсон Н. Б. Реконструкция динамических систем в приложении к решению задачи защиты информации. ЖТФ, 1998. Т. 68, №12. С. 1-8.
5. Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Восстановление параметров нелинейной динамической системы Чуа. Электронное приборостроение. Научно-практический сборник., Вып. 3 (41). Казань: КГТУ (КАИ). 2005 . С. 108-113.
6. Афанасьев В.В., Логинов С.С., Польский Ю.Е. Восстановление параметров системы Чуа с динамическим хаосом по порождаемым ею сигналам при действии комплекса шумов и помех // Научно-техническая конференция по вопросам информатики, вычислительной техники и информационной безопасности: Материалы конференции. Казань: Изд-во Казан, гос. техн. ун-та, 2006. С. 9-11.
7. Афанасьев В.В., Михайлов С.В., Польский Ю.Е., Торопов А.Ю. Влияние основных параметров моделирования на ЭВМ на поведение динамических систем со странными аттракторами. // Письма в ЖТФ. 1989. Т.21. Вып.23. С.10-14.
8. Дружинин Г.В. Методы оценки и прогнозирования качества.- М.: Радио и связь, 1982.- 160с.
9. Зінченко М. В., Зінковський Ю. Ф. Випромінювання некротних гармонік в нелінійній радіолокації // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2011. – Вип. №45. – С. 159-169.
10. Зінченко М. В., Зінковський Ю. Ф., Прокоф'єв М. І. Значущість рівня потужності зонduючого сигналу в нелінійній радіолокації // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. Науково-технічний збірник. – 2010. – Вип. 1(20). – С. 102-113.
11. Мацумото. Хаос в електронних схемах. // ТИИЭР, Тематический выпуск: Хаотические системы. 1987. Т. 75, №8. С. 66 - 87.
12. Павлов А. Н., Янсон Н. Б., Анищенко В. С. Применение статистических методов при решении задачи глобальной реконструкции. Письма в ЖТФ, 1997. Т. 23. Вып. 8. С. 7-13.

*Зінченко М. В., Зінковський Ю. Ф. Динамічні особливості нелінійних розсіювачів під час зондування. В роботі показано, що нелінійні розсіювачі під час зондування нелінійним радіолокатором генерують завдяки наявності елементів з інерційними вла-*

стивостями так звані хаотичні коливання. Розглянуто задачу реконструкції динамічної системи за експериментальними даними. Обґрунтовано, що на відміну від методів «глобальної» реконструкції, метою яких є відновлення динамічних систем (ДС) по одомірній тимчасовій реалізації, метод власних координат дозволяє відновити параметри тільки відомої ДС. Зазначено, що перевагою даного методу є можливість відновлення параметрів нелінійної ДС при комплексному впливі як низькочастотних, так і високочастотних адитивних і мультиплікативних шумів. Також запропоновано, що метод може бути використаний у якості тесту на можливість відновлення параметрів генеруючої системи по реалізаціях сигналів.

**Ключові слова:** нелінійна радіолокація, нелінійний розсіювач, хаотичний сигнал, реконструкція динамічної системи, метод власних координат.

*Zinchenko M. V., Zinkovskiy Y. F. **Динамические особенности нелинейных рассеивателей во время зондирования.** В работе показано, что нелинейные рассеиватели во время зондирования нелинейным радиолокатором генерируют благодаря наличию элементов с инерционными свойствами, так называемые хаотические колебания. Рассмотрена задача реконструкции динамических систем по экспериментальным данным. Обосновано, что в отличие от методов "глобальной" реконструкции, целью которых является восстановление динамических систем (ДС) по одномерной временной реализации, метод собственных координат позволяет восстановить параметры только известной ДС. Отмечено, что преимуществом данного метода является возможность восстановления параметров нелинейной ДС при комплексном воздействии как низкочастотных так и высокочастотных аддитивных и мультипликативных шумов. Также предложено, что метод может быть использован в качестве теста на возможность восстановления параметров генерирующей системы по реализациях сигналов.*

**Ключевые слова:** нелинейная радиолокация, нелинейный рассеиватель, хаотический сигнал, реконструкция динамической системы, метод собственных координат.

*Zinchenko M. V., Zinkovskiy Y. F. **Dynamic characteristics of nonlinear scatterers during sensing.** It is shown that the nonlinear scatterers during sensing generate chaotic oscillations. The problem of reconstruction of dynamic systems from experimental data. Substantiated that the method your own origin may restore the only known dynamic system. It is noted that an advantage of this method is the ability to recover parameters of a nonlinear dynamical system with the combined action of both low frequency and high frequency of additive and multiplicative noise. It is suggested that the method can be used as a test of your ability to restore the parameters generating system implementations signals.*

**Key words:** nonlinear radar, nonlinear scatterers, the chaotic signal, reconstruction of the dynamical system, method your own origin.