

УДК 621.3.082



В.Ю. Кучерук, д.т.н.
професор, завідувач кафедри метрології та промислової автоматики. Напрямок наукової діяльності – енергозбережні технології, системи технічної діагностики, метрологія та вимірювальна техніка.



В.М. Севаст'янов к.т.н.
Напрямок наукової діяльності – розробка та дослідження інформаційно-вимірювальних контролів та технічної діагностики.



В.С. Маньковська аспірант. Напрямок наукової діяльності – побудова високочутливих засобів вимірювання та контролю з використанням генераторів хаотичних коливань.

Вінницький національний технічний університет,

Viktoriya_M@i.ua

ВИКОРИСТАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ХАОТИЧНИХ КОЛИВАНЬ У ВИМІРЮВАЛЬНІЙ ТЕХНІЦІ

Проведено аналіз використання прецизійних генераторів хаотичних коливань в вимірювальній техніці. Проведено моделювання в середовищі Multisim прецизійних генераторів хаотичних коливань.

Ключові слова: генератори хаотичних коливань, динамічний хаос.

Вступ

Динамічний хаос являє собою широко розповсюджене явище, яке полягає у виникненні в динамічних системах складних неперіодичних коливань з неперервним спектром. Використання динамічних хаотичних систем дозволяє створювати вимірювальні пристрої, які мають властивості детермінованого хаосу.

Однією з основних властивостей хаотичної системи є структурна стійкість атрактора такої системи при високій чутливості хаотичного процесу до параметрів системи. Швидкість зміни хаотичного процесу при малій зміні параметра системи оцінюється як експоненціальна.

Ця властивість дозволяє суттєво збільшити чутливість методів вимірювання при використанні в якості вимірювальних схем нелінійних генераторів хаотичних коливань (ГХК).

Друга фундаментальна властивість хаотичних систем – висока чутливість до варіацій початкових умов – дозволяє прогнозувати сталі значення параметра нелінійної хаотичної системи по початковій ділянці траєкторії хаотичного процесу. Таким чином чутливість такого вимірювального пристрою практично не буде залежати від розрядності АЦП, а його динамічні характеристики – від частоти дискретизації [1, 2].

Критерій прецизійності генераторів хаотичних коливань

Сполучення слів «прецизійний» і «хаос» є суперечливим. Дійсно, характерна для динамічного хаосу експоненціальна розбіжність близьких траєкторій у фазовому просторі динамічної системи призводить до її чутливості по відношенню до параметрів і початкових умов, спричиняючи непередбачуваність поведінки системи. Детермінованість динамічного хаосу дозволяє реалізовувати відтворювані хаотичні режими в динамічних системах з однаковою структурою. Для цього необхідно забезпечувати якомога більшу відповідність основних параметрів і початкових умов систем.

Генератор хаотичних коливань є прецизійним, якщо він має такі властивості:

- відтворює хаотичні режими при заміні будь-якого елемента на аналогічний;

- має низьку чутливість до змін зовнішніх умов (наприклад температури);
- у реалізованій на його основі парі ведуча-ведена система спостерігається синхронний хаотичний відгук, причому ведена система демонструє абсолютну стійкість відгуку;
- має відповідність між результатами моделювання (математична модель, схемотехнічне моделювання) і фізичним експериментом;
- зберігає сукупність хаотичних мод і переходів між ними від взірця до взірця [3].

Структура прецизійних ГХК

На даний момент відома велика кількість генераторів хаотичних коливань [3], що відрізняються як за структурою, так і за типовими хаотичними характеристиками. Однак їхньою загальною властивістю є те, що вони представляють собою сукупність одного або декількох нелінійних елементів. Лінійні елементи можуть бути пасивними (резистори, конденсатори, котушки індуктивності) і активними (підсилювачі). Функцію нелінійних елементів можуть виконувати як стандартні елементи (діоди, транзистори), так і спеціально розроблені пристрої або схеми, що мають нелінійну сигнальну характеристику.

Однією із вищенаведених вимог до прецизійних генераторів є ідентичність хаотичних режимів. Однак, для того щоб два або більше генераторів однієї і тієї ж структури демонстрували режими з високими ступенями відповідності, необхідно попарно забезпечити ідентичність усіх складових його однакових елементів. Лінійні елементи можна підібрати з достатньо високою точністю. Ідентичність нелінійних елементів полягає у співпаданні їх сигнальних характеристик. У випадку використання ідентичних стандартних нелінійних елементів, що мають гладкі сигнальні характеристики, їх підбір представляє собою досить складну проблему.

Вирішити цю проблему можливо шляхом використання нелінійних елементів з відтворюваними функціями перетворення. Прикладами вказаних функцій є кусково-лінійні функції, що складаються із декількох лінійних сегментів. Основна ідея при цьому базується на можливості відтворення характеристики нелінійного елемента на кожному із сегментів за рахунок його лінійності. Необхідно зауважити, що використання елементів з кусково-лінійними характеристиками ще не є достатньою умовою прецизійності генераторів. Конструкція нелінійного елемента повинна забезпечувати не тільки кусково-лінійну сигнальну характеристику, але і точне її відтворення на різних зразках. Генератори з нелійними елементами, що не задовольняють даній умові, не можуть вважатися прецизійними. Як нелінійні елементи в них використовуються діоди, що мають значний розкид характеристик. Іншими словами, необхідна розробка нелінійних елементів, конструкції яких містять тільки лінійні компоненти.

Не менш важливим фактором є і конкретна форма кусково-лінійної характеристики, що з однієї сторони, повинна забезпечувати генерацію хаотичних коливань, а з іншої – створювати умови для отримання синхронного хаотичного відгуку, стійкого по відношенню до невеликого відхилення параметрів генераторів або інших факторів, що збурюють, усунення яких практично неможливе.

Кільцевий ГХК з 1,5 степенями вільності

Генератор відноситься до класу хаотичних кільцевих автоколивальних систем, в яких його складові послідовно з'єднуються в схему, що утворює єдине кільце зворотного зв'язку. З'єднання елементів генератора відбувається через буферні пристрої, що забезпечують однонапрявленість зворотного зв'язку генератора і розв'язку між елементами. Щоб реалізувати вказані властивості, буферні пристрої повинні мати великий вхідний і малий вихідний опір.

Генератор хаотичних коливань є автоколивальною системою (рис. 1), що складається з нелінійного елемента F_z (підсистема 1) з амплітудним перетворенням вхідного сигналу z , R_1C_1 – фільтра нижніх частот (підсистема 2), $R_2L_1C_2$ – фільтра нижніх частот (підсистема 3). Буферні каскади реалізовані на операційних підсилювачах.

Характеристика нелінійного елемента має вигляд

$$F(z) = M \cdot z \cdot \exp(-z^2), \quad (1)$$

де M - коефіцієнт підсилення.

Динаміка такого генератора включає в себе різноманітні хаотичні режими з широкими зонами їх стійкості у просторі керуючих параметрів генератора. Форма характеристики (1) є гладкою функцією, що ускладнює відтворюваність та прецизійність такого генератора. Для забезпечення відтворюваності генератора при різноманітності хаотичних режимів використаємо нелінійний елемент з кусково-лінійною п'ятисегментною характеристикою (рис. 1 б), що описується виразом

$$F(z) = M[|z + E_1| - |z - E_1| + 1/2(|z - E_2| - |z + E_2|)], \quad (2)$$

де M - коефіцієнт підсилення; E_1, E_2 - константи.

Конкретний вибір E_1, E_2, M однозначно визначає характеристику нелінійного елемента (2).

Розглянемо кожну підсистему, позначаючи напруги на конденсаторах C_1 та C_2 через U_{C_1} та U_{C_2} відповідно.

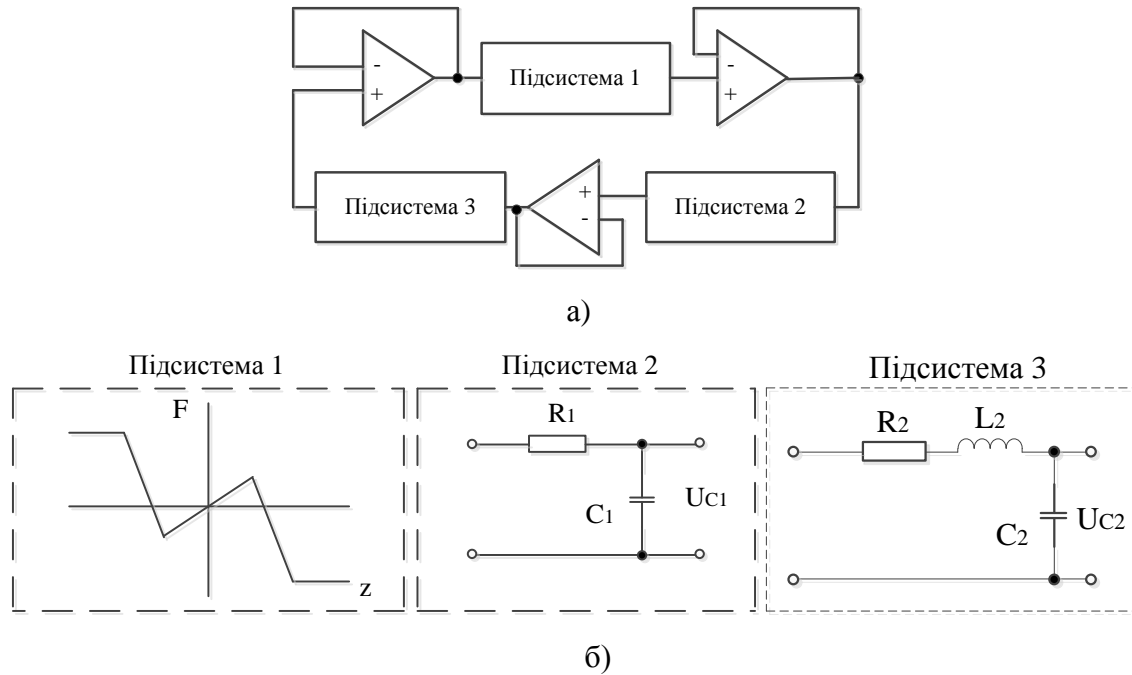


Рисунок 1 – Кільцевий ГХК з 1,5 степенями вільності: а – блок схема, б – структура підсистем

Підсистема 1 представляє собою чотириполюсник з нелінійною функцією перетворення амплітуди вхідного сигналу $F(z)$ (2). Вхідним сигналом для неї є вихідний сигнал підсистеми 3, тобто напруга U_{C_2} . Таким чином, вихідним сигналом підсистеми 1 є напруга $F(U_{C_2})$.

Підсистема 2 представляє собою фільтр нижніх частот першого порядку, на вхід якого подається напруга $F(U_{C_2})$, а вихідним сигналом є U_{C_1} . У відповідності до другого закону Кірхгофа та з урахуванням великого вхідного опору буферного каскаду, під'єданого до виходу підсистеми, залежність між напругами описується рівнянням

$$C_1 R_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} = F(U_{C_2}) - U_{C_1}. \quad (3)$$

Підсистема 3 є фільтром нижніх частот другого порядку з вхідною напругою U_{C_1} і вихідною U_{C_2} . По аналогії з підсистемою 2 використання закону Кірхгофа дає рівняння

$$L_2 C_2 \frac{d^2 U_{C_2}}{dt^2} + C_2 R_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} = U_{C_1} - U_{C_2}. \quad (4)$$

Об'єднання (3) та (4) призводить до системи диференціальних рівнянь, що описують динамічні режими генератора:

$$\begin{cases} C_1 R_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} = F(U_{C_2}) - U_{C_1}; \\ L_2 C_2 \frac{d^2 U_{C_2}}{dt^2} + C_2 R_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} = U_{C_1} - U_{C_2}. \end{cases} \quad (5)$$

Введемо позначення $U_{C_1} = x$, $U_{C_2} = z$, $R_1 C_1 = T$, $R_2 / L_2 = \alpha$, $1 / (L_2 C_2) = \omega^2$ та нову змінну $y = \frac{dU_{C_2}}{dt} - \frac{R_2 U_{C_2}}{L_2}$.

Тоді система (5) приймає вигляд

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{F(z) - x}{T}; \\ \frac{dy}{dt} = \omega^2(x - z); \\ \frac{dz}{dt} = y - \alpha \cdot z, \end{cases} \quad (6)$$

де α , ω , T , M , E_1 , E_2 – параметри системи; $F(z)$ – характеристика нелінійного елемента (2).

Результатом розв'язку системи (6) є залежності $x(t)$, $z(t)$. Змінюючи параметри системи α , ω , T , M , E_1 , E_2 і аналізуючи реалізації $x(t)$, $z(t)$, фазові портрети в площині x , z , біфуркаційні діаграми, спектри та автокореляційні функції, можна досліджувати режими роботи генератора.

Система рівнянь (6) має три положення рівноваги:

$$\begin{cases} (x, y, z)_1 = (0, 0, 0); \\ (x, y, z)_{2,3} = \pm \frac{2ME}{M+1} (1, \alpha, 1). \end{cases} \quad (7)$$

У першому положенні M приймає різні значення. Друге і третє положення рівноваги відбувається при $M > 1$. При проходженні параметру M через біфуркаційне значення $M = 1$ нульове положення втрачає стійкість. Два ненульових положення рівноваги знаходяться на значній відстані від початку координат і є нестійкими. Одночасно із виникненням коливань навколо положення рівноваги виникають стійкі межі циклів кінцевих розмірів. Автоколивання, що відповідають цим стійким межам, мають частоту близьку до резонансної частоти фільтра другого порядку.

Для моделювання прецизійного кільцевого генератора була вибрана його принципова схема, запропонована в [3]. Моделювання роботи кільцевого генератора проведені в системі Multisim (рис. 2).

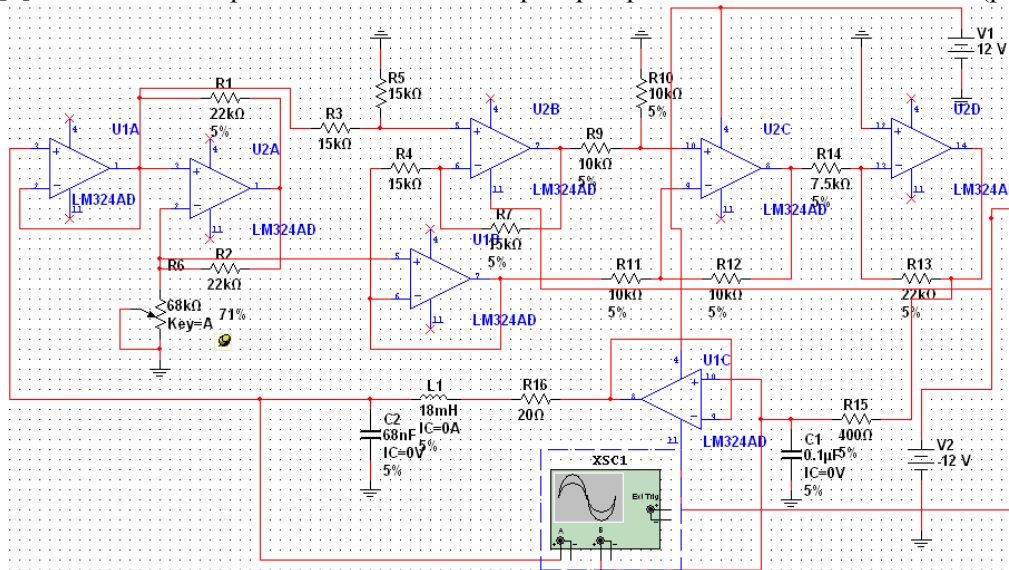


Рисунок 2 - Моделювання схеми електричної принципової в системі Multisim

Результати моделювання в системі Multisim наведені на рис. 3.

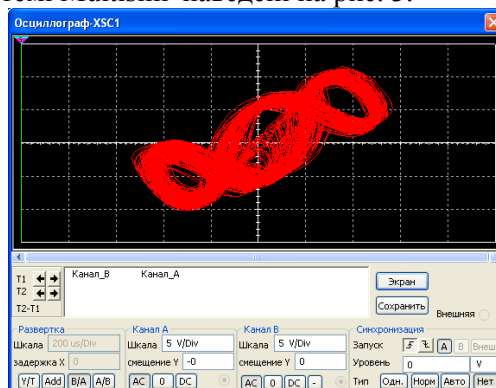


Рисунок 3 - Результати моделювання схеми електричної принципової в системі Multisim

Як операційні підсилювачі в схемі використані мікросхеми LM324A з напругою живлення $\pm 12\text{В}$. До нелінійного елемента через буферні підсилювачі під'єднані фільтри нижніх частот (підсистеми 2 і 3 на рис. 1, б), що утворюють кільцевий генератор у відповідності до рис. 1, а. Зі збільшенням M регулярні (періодичні) коливання втрачають стійкість і після ряду біфуркацій подвоєння стають хаотичними. На наступному етапі біфуркації коливання охоплюють всі три положення рівноваги. Хаотичний аттрактор при цьому стає подібним до подвійної спіралі. Необхідно зазначити, що параметри α , ω , T , M , E_1 , E_2 залишаються незмінними і мають наступні значення: $\alpha = 0,22$, $\omega = 1$, $T = 3$, $E_1 = 0,5$, $E_2 = 2$.

Висновки

Моделювання схеми в середовищі Multisim показало, що у випадку вибору однакових параметрів усі генератори демонструють ідентичні за структурою і основними характеристиками хаотичні коливання. Заміна операційних підсилювачів або пасивних елементів (в межах вказаної точності) не призводить до порушення хаотичних режимів. Більш того, вітчизняні операційні підсилювачі КР1401УД2Б, що являються аналогом підсилювачів серії LM324A, забезпечують ідентичні результати.

Розробка прецизійних генераторів хаотичних коливань і використання їх в вимірвальній техніці дозволяє створювати високочутливі засоби вимірювання та контролю.

Список літературних джерел

1. Введение в теорию хаотических систем для инженеров [Электронный ресурс] /Паркер Т.С., Чуа Л.О. // ТИИЭР, 1987. – Т.75, №8. – С. 6. – Режим доступа к журналу: <http://it.fitib.altstu.ru/index.php?action=show&show=140>.

2. Воронов С.С. Измерительная техника/ Воронов С.С., Колпаков Л.В., Кузнецов В.А. – 1996. – № 12. – 16 с.

3. Шахтарин Б.И., Кобылкина П.И., Сидоркина Ю.А., Кондратьев А.В., Митин С.В. Генераторы хаотических колебаний: учебное пособие. – М.: Гелиос АРВ, 2007. – 248 с.