

УДК 621.373

ПРЕЦИЗИЙНИЙ ГЕНЕРАТОР ХАОСУ В ІНВАРІАНТНИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ



Л.Г. ІВОЛГА,

Л.Ф. ПОЛІТАНСЬКИЙ,

Р.Л. ПОЛІТАНСЬКИЙ

Чернівецький національний
університет ім. Юрія Федьковича

В роботі проводиться аналіз стану розроблення та використання прецизійних генераторів хаосу в системах зв'язку. Проведено моделювання в середовищі Multisim та експериментальне дослідження прецизійного генератора хаосу з покращеними передавальними властивостями.

The paper analyzes the development and use of precision chaos generators in communications systems. We have done modeling in Multisim and experimental study of precision chaos generator with improved properties.

В работе проводится анализ состояния разработки и использования прецизионных генераторов хаоса в системах связи. Проведено моделирование в среде Multisim и экспериментальное исследование прецизионного генератора хаоса с улучшенными передаточными свойствами.

Вступ

Динамічний хаос являє собою широко розповсюджене явище, яке полягає у виникненні в динамічних системах складних неперіодичних коливань з неперервним спектром [1]. Починаючи з 1992 року було запропоновано ряд способів передавання сигналів, що використовують хаотичну динаміку. Перспективним напрямком динамічного хаосу є використання його в телекомунікаційних технологіях. Це пов'язано з тим, що він має ряд властивостей, які можуть бути корисними при передаванні інформації:

- створення складних коливань, використовуючи відносно нескладні електронні схеми;
- керування хаотичними режимами за допомогою незначних змін параметрів системи, тобто отримання сигнального простору високої розмірності із збільшеною швидкістю модуляції несучої частоти різними модами хаотичних коливань;
- підвищення інформаційної ємності повідомлень (символьна динаміка);
- нетрадиційний підхід до способів мультиплексування і демультіплексування, що ґрунтується на явищі самосинхронізації; це створює можливість розвитку систем з багатокористувацьким доступом, актуальність яких є очевидною для систем мобільного зв'язку.

Елементом системи зв'язку може виступати генератор хаосу, параметри якого потрібно з високою точністю відтворювати при серійному виробництві. Це обумовлено жорсткими вимогами до параметрів сигналів передавача і приймача, які використовуються у системах зв'язку. Якість передавання інформації в системах зв'язку з синхронним хаотичним відгуком безпосередньо визначається його характеристика-

ми. Ідеальний відгук може бути отриманий тільки у разі відсутності факторів, що збурюють. За реальних умов забезпечення синхронного хаотичного відгуку високої якості ускладнене, що обумовлює додаткові шуми десинхронізації, внаслідок чого якість передавання інформації погіршується [2]. Причому ця проблема є актуальною як для безпроводових, так і для проводових систем зв'язку [3]. Однією з причин виникнення шумів десинхронізації є неідентичність параметрів однакових елементів у хаотичних модулях передавача і приймача.

При проведенні експериментів точність задавання параметрів елементів визначається можливостями обладнання, яке використовується. При реалізації хаотичних модулів, наприклад на сигнальних процесорах, вплив неідентичності елементів може бути зведений до мінімуму. З іншої сторони, оскільки в аналогових конструкціях модулів повне усунення неідентичності елементів неможливе, то вирішення проблеми в такому випадку доступне шляхом зменшення впливу факторів, що збурюють [4].

Виникає запитання: яким чином звести до мінімуму вплив цих факторів в реальних умовах? Оскільки кожен елемент, що входить до складу модуля передавача, потенційно може бути неідентичним по відношенню до свого аналогу в модулі приймача, то загальний підхід до вирішення цієї проблеми полягає у розробці модулів простої конфігурації з мінімально можливим числом елементів. Крім того, в різноманітних модулях з приблизно однаковим числом елементів важливу роль відіграє їх конкретна структура. На рис. 1 показано вплив параметрів елементів модулів на якість синхронного хаотичного відгуку на основі кільцевого генератора з 1,5 степенями свободи (крива 1) та модифікованого кола Чуа (крива 2). Тому перший генератор (рис. 1) при інших рівних умовах дозволяє отримувати більш якісний синхронний відгук у порівнянні з колом Чуа. Це обумовлено абсолютною стійкістю відгуку в парі ведуча-ведена система на базі кільцевого генератора [5].

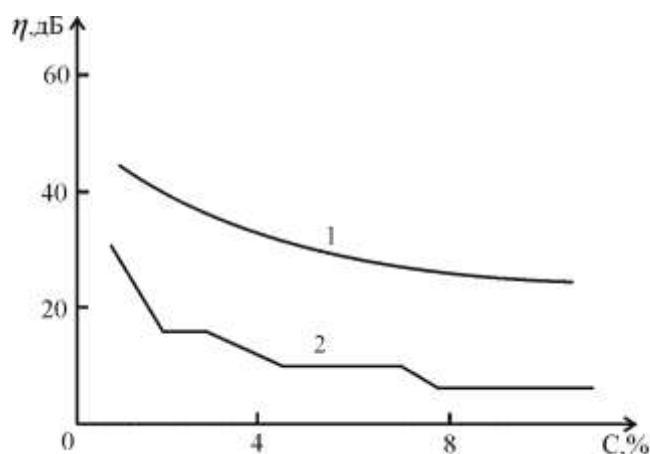


Рис. 1. Вплив параметрів елементів (C) хаотичних модулів передавача і приймача на якість синхронного відгуку η : 1 – хаотичні модулі на основі кільцевого генератора з 1,5 степенями свободи; 2 – хаотичні модулі на основі кола Чуа

Як один із способів боротьби з неідентичністю параметрів можна розглядати індивідуальний підбір однакових елементів з метою забезпечення високого ступеню ідентичності їх параметрів. Однак такий підхід реалізується, в основному, на етапі макетування при проведенні фізичних експериментів і є безперспективним у випадку переходу до серійного виробництва модулів.

Питання стосовно використання інтегральної технології виготовлення хаотичних модулів з точки зору можливостей відтворення їх параметрів залишається відкритим внаслідок відсутності належного досвіду у цій області. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є розроблення генераторів хаосу, що мають прецизійні властивості і є основою конструкції хаотичних модулів передавача та приймача.

I. Критерій прецизійності генераторів

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 сигналів є прецизійним, якщо він має такі властивості [6]:

- 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, схематичне моделювання) і фізичним експериментом;
- зберігає сукупність хаотичних мод і переходів між ними від взірця до взірця.

В контексті проблеми, що розглядається, в якості критерію прецизійності генератора надалі будемо вважати можливість отримання високоякісного синхронного хаотичного відгуку в парі ведуча-ведена система на його основі.

Хаотичний синхронний відгук, як показник прецизійності, може бути покладений в основу методики порівняння різноманітних зразків генераторів хаосу однакової структури на предмет відповідності їх параметрів. Виникає запитання: як управляти двома генераторами хаосу однакової структури, але з різними параметрами. Реалізовані сигнали на виходах генераторів в різні моменти часу можуть значно відрізнятися один від одного навіть у випадку ідентичності їх параметрів в силу специфіки хаотичної динаміки. Тому пряме співставлення характеристик може слугувати основою для результатів порівняння. Оцінювання та співставлення статистичних характеристик генераторів (спектральна густина потужності, функції розподілу і т.д.) можна здійснити

за допомогою існуючої вимірювальної апаратури [7]. Однак, будучи усередненими по часу, ці характеристики не можуть гарантувати відповідність параметрів генераторів.

З іншого боку, якщо можлива декомпозиція генераторів та їх формування на основі пари ведуча-ведена система, то можна здійснити перевірку ступеню ідентичності параметрів генераторів, причому критерієм ідентичності буде слугувати наявність на виході веденої системи синхронного хаотичного відгуку. У цьому випадку ведена система є нелінійним узгодженим фільтром і відіграє роль визначника «свій-чужий». «Свій» сигнал, що поступає на вхід веденої системи, призводить до появи на виході своєї копії, а «чужий» сигнал проходить через систему із значними спотвореннями. Якщо параметри ведучої і веденої систем ідентичні, то сигнал з виходу ведучої системи є «своїм» по відношенню до веденої системи і навпаки. Ступінь відповідності параметрів систем при цьому оцінюється по якості синхронного хаотичного відгуку. Відсутність синхронного відгуку вказує на те, що на вхід веденої системи надійшов «чужий» сигнал, що є стороннім або сигналом, що відповідає випадку розбалансованості параметрів ведучої і веденої систем.

II. Структура прецизійних генераторів хаосу

На даний момент відома велика кількість генераторів хаосу, що відрізняються як за структурою, так і за типовими хаотичними характеристиками [6]. 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 вищеприведених 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 нелінійними 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 сигналів, 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.

III. Кільцевий генератор хаосу з 1,5 степенями свободи

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 однонапрямленість зворотного зв'язку генератора і розв'язку між елементами. Щоб реалізувати вказані властивості, буферні пристрої повинні мати великий вхідний і малий вихідний опір.

Генератор хаосу є автоколивальною системою (рис. 2), 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 [6].

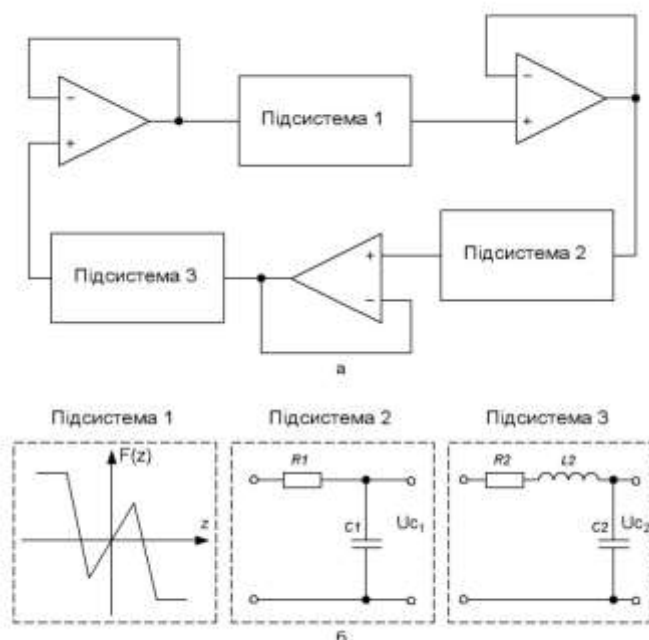


Рис. 2. Кільцевий генератор хаосу з 1,5 степенями свободи:

а – блок-схема, б – структура підсистем

Характеристика нелінійного елемента має наступний 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. 2 б), що описується наступним виразом:

$$F(z) = M \left[|z + E_1| - |z - E_1| + \frac{1}{2} (|z - E_2| - |z + E_2|) \right], \quad (2)$$

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

Конкретний вибір E_1, E_2, M однозначно визначає характеристику нелінійного елемента (2). Наявність зовнішніх обмежуючих сегментів пов'язана з реально існуючим обмеженням рівня амплітуд вихідних сигналів в різних пристроях, що використовуються в електроніці. Динамічні режими генератора описуються за допомогою диференціальних рівнянь, які отримуються із законів Кірхгофа для підсистем-чотириполіусників (рис. 2 б).

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

Підсистема 1 представляє собою чотириполіусник 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 наступним 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 наступне 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:

$$\begin{cases} C_1 R_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = F(U_{c2}) - U_{c1}; \\ L_2 C_2 \frac{d^2 U_{c2}}{dt^2} + C_2 R_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = U_{c1} - U_{c2}. \end{cases} \quad (5)$$

Введемо позначення $U_{c1} = x$, $U_{c2} = z$, $C_1 R_1 = T$, $\frac{R_2}{L_2} = \alpha$, $\frac{1}{(L_2 C_2)} = \omega^2$ та нову змінну $y = \frac{dU_{c2}}{dt} - \frac{R_2 U_{c2}}{L_2}$.

Тоді система (5) приймає наступний 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 $\alpha, \omega, T, M, E_1, E_2$ – параметри системи; $F(z)$ – характеристика нелінійного елемента (2).

Результатом розв'язку системи (6) є залежності $x(t), z(t)$. Змінюючи параметри системи $\alpha, \omega, T, M, E_1, E_2$ 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 [8].

Інваріантність приймальної та передавальної частин системи до інверсії полярності сигналу та можливість визначення його спектральних характеристик обумовлює використання таких генераторів у системах зв'язку [9]. При забезпеченні інваріантності до інверсії полярності сигналу на виході приймальної системи буде синхронізований сигнал незалежно від того, інвертований сигнал передавальної системи чи ні. Дослідження спектральних характеристик дозволяє зазначити, що спектр є суцільним та рівномірним у певній смузі частот.

IV. Кільцевий генератор хаосу з 1,5 степенями свободи

Для експериментальної реалізації прецизійного кільцевого генератора була вибрана його принципова схема, запропонована в [6]. Моделювання роботи кільцевого генератора проведені в системі Multisim 11 (рис. 3).

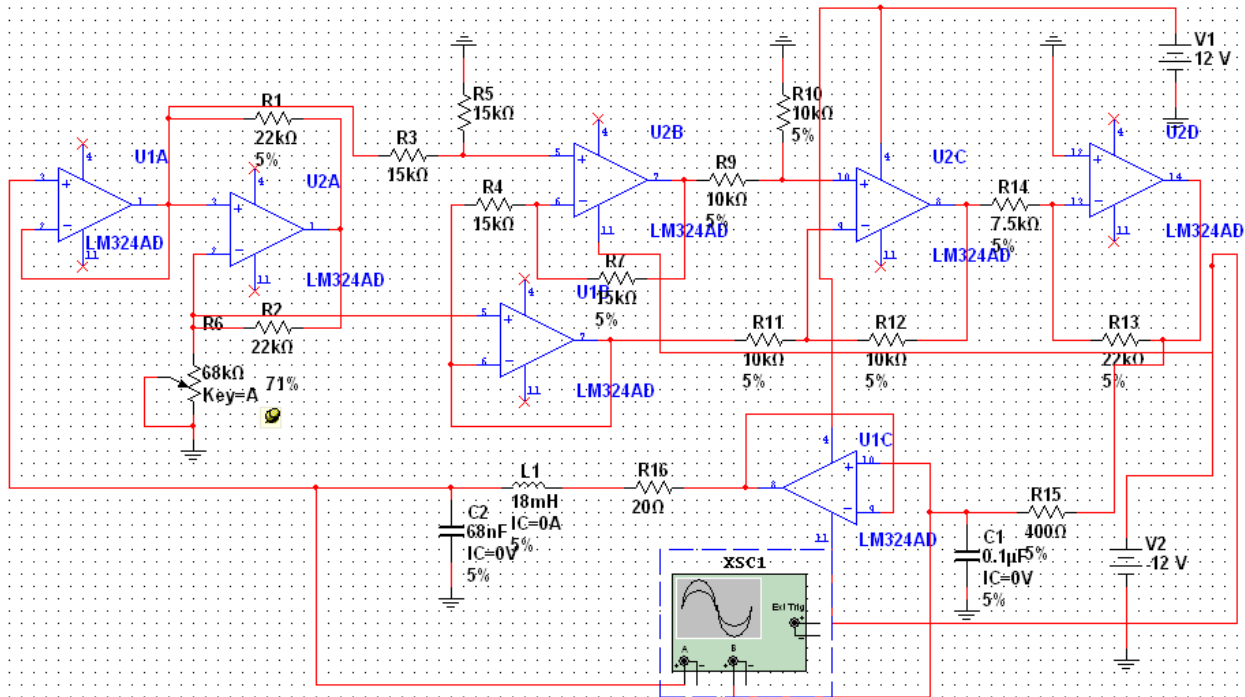


Рис. 3. Моделювання схеми електричної принципової в системі Multisim 11

Результати моделювання в системі Multisim 11 приведені на рис. 4.

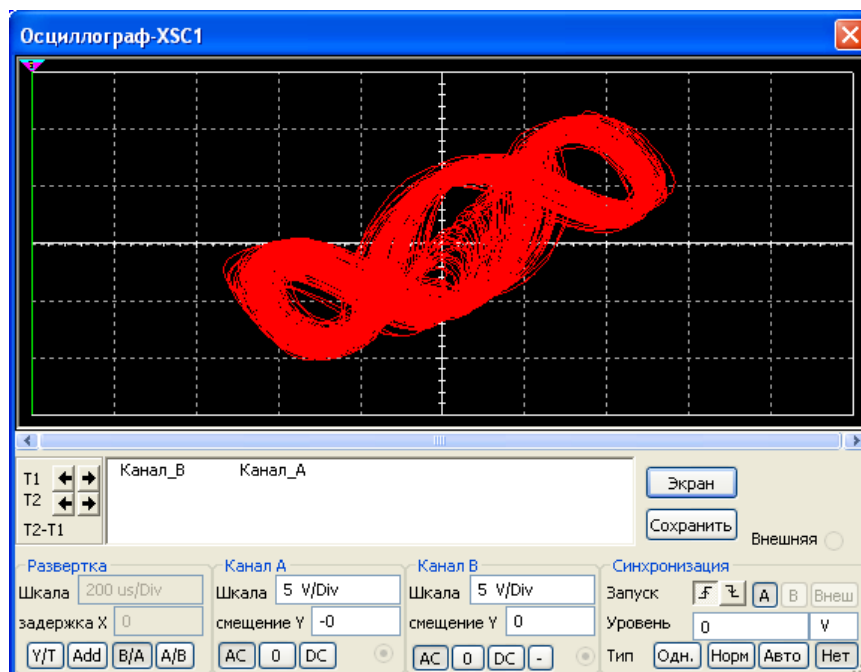


Рис. 4. Результати моделювання схеми електричної принципової в системі Multisim 11

Необхідно зазначити, що в реальних умовах схема не працювала. Фазовий портрет роботи генератора зовсім не відповідав аналітичним результатам. Для забезпечення працездатності схеми генератора необхідно було провести додаткове налаштування опорів резисторів у колах зворотного зв'язку, як показано на рис. 5.

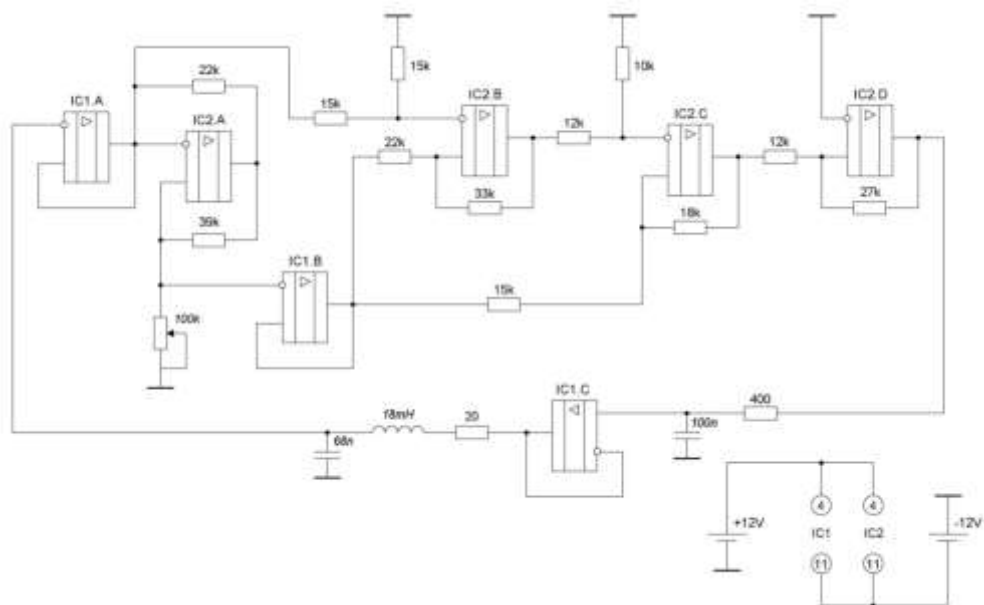
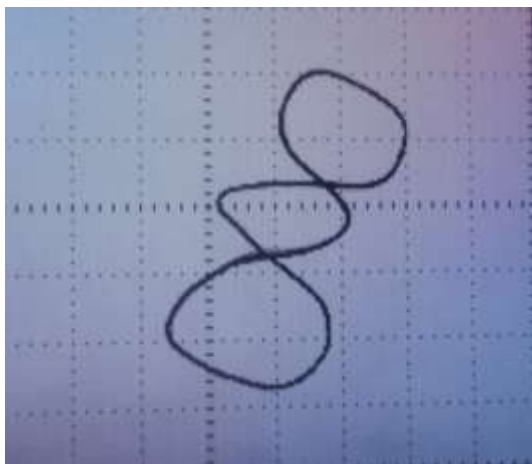


Рис. 5. Схема електрична принципова прецизійного генератора хаосу

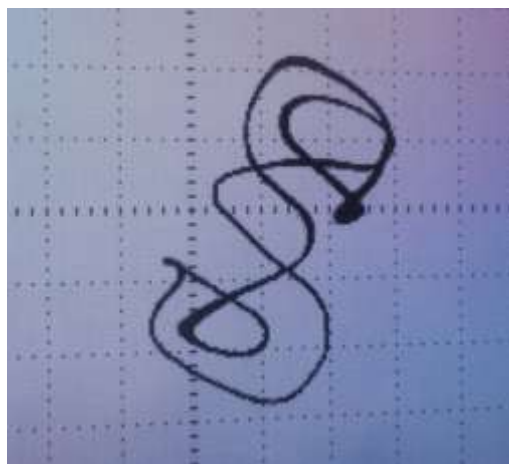
Як операційні підсилювачі в схемі використані мікросхеми LM324A з напругою живлення ± 12 В. До нелінійного елемента через буферні підсилювачі під'єднані фільтри нижніх частот (підсистеми 2 і 3 на рис. 2 б), що утворюють кільцевий генератор у відповідності до рис. 2 а. Зі збільшенням M регулярні (періодичні) коливання втрачають стійкість (рис. 6) і після ряду біфуркацій подвоєння стають хаотичними (рис. 7). На наступному етапі біфуркації коливання охоплюють всі три положення рівноваги. Хаотичний атрактор при цьому стає подібним до подвійної спіралі (рис. 8). Необхідно зазначити, що параметри $\alpha, \omega, T, E_1, E_2$ залишаються незмінними і мають наступні значення: $\alpha = 0,22$, $\omega = 1$, $T = 3$, $E_1 = 0,5$, $E_2 = 2$.

Висновки

1. Більша кількість розроблених на даний час генераторів хаосу не може використовуватися для генерації несучих хаотичних коливань, оскільки генеровані хаотичні коливання мають спектри потужності, що володіють великою сегментністю, тоді як для вирішення прикладних завдань передавання інформації необхідна рівномірна спектральна щільність у смузі генерації. Для синхронізації коливань у приймачеві та передавачеві необхідне створення прецизійних генераторів зі стабільними характеристиками, що мають малий розкид, або розробка генераторів з практично допустимою чутливістю до розкиду параметрів. У порівнянні зі звичайними генераторами хаосу прецизійні генератори володіють покращеними передавальними властивостями, високими стійкістю та якістю синхронного хаотичного відгуку.

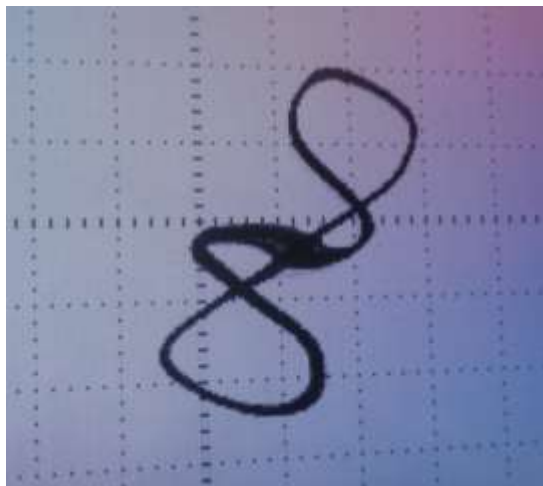


а) при $M = 1,1$



б) при $M = 1,7$

Рис. 6. Періодичний режим коливань

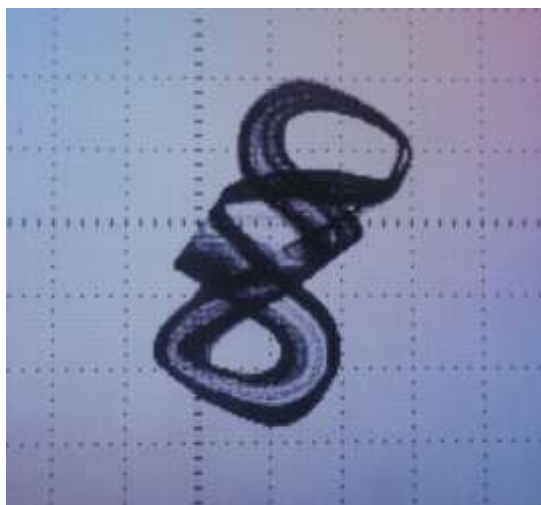


а) при $M = 2,2$

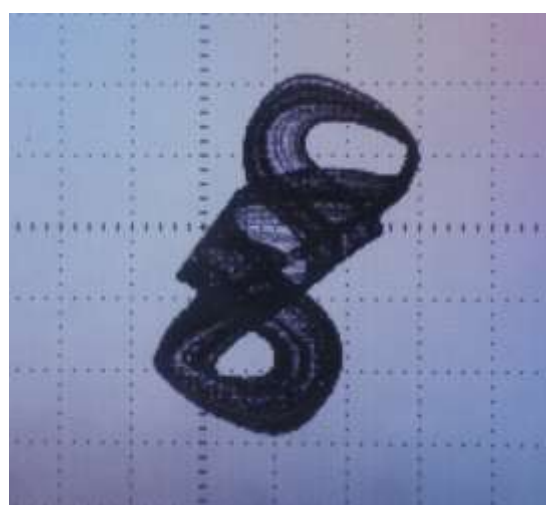


б) при $M = 2,9$

Рис. 7. Перехідний режим коливань



а) при $M = 3,5$



б) при $M = 5$

Рис. 8. Хаотичний режим коливань

2. Експерименти показали, 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 LM324А, забезпечують ідентичні результати.

3. Розробка прецизійних генераторів хаосу і використання їх в системах зв'язку допомагає полегшити проблему передавання інформації при невідповідності однакових елементів в хаотичних модулях передавача і приймача, і тим самим підвищити якість передавання. Так, наприклад, перехід від модифікованої ланки Чуа до прецизійного кільцевого генератора дозволив підвищити відношення сигнал/шум на виході приймача на 5-8 дБ при однаковій точності підбору елементів.

4. Досліджений генератор хаосу може бути використаний як система, яка є інваріантною по відношенню до інверсії полярності сигналу.

5. Спектральні характеристики сигналу вказують на суцільність і рівномірність його спектру у широкій смузі частот.

6. Відомі в наш час генератори хаосу, що використовуються в інваріантних системах зв'язку (класичне дискретне відображення Хенона та нелінійні моделі, розроблені американським вченим Спроттом), мають недоліки, що ускладнюють їх практичне використання з проблеми відтворення сегментованого спектра, в той час як спектр розробленого авторами генератора є суцільним. Отже, його використання у системах широкосмугового зв'язку є більш доцільним.

Можливість синхронізації передавача і приймача обумовлює використання таких генераторів в багатокористувальницьких системах (мобільний зв'язок). Це питання є недостатньо вивченим і потребує додаткових досліджень.

Список литературы:

1. Шустер Г.Г. Детерминированный хаос: введение. – М.: Мир, 1989. – 240 с.
2. Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи – М.: Изд-во физ-мат. лит., 2002. – 252 с.
3. Шахтарин Б.И. Анализ систем синхронизации методом усреднения. – М.: Радио и связь, 1999. – 496 с.
4. Линдсей В. Системы синхронизации в связи и управлении. – М: Сов. Радио, 1978. – 600 с.
5. Pecora L.M., Carroll T.L. Synchronization in chaotic systems // Physical review letters. – 1990. – Vol. 64, № 8. – С. 821–824.
6. Шахтарин Б. И., Сидоркина Ю. А., Аливер В.Ю., Кобылкина П.И., Митин С.В. Генераторы хаотических колебаний: учебное пособие. – М.: Гелиос АРВ, 2007. – 248 с.
7. Шахтарин Б.И., Сидоркина Ю. А., Аливер В.Ю., Кобылкина П.И. Исследование режимов генераторов хаоса // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 12. – С. 1471–1483.
8. Мун Ф. Хаотические колебания: вводный курс для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 1990. – 312 с.
9. Леонов К.Н. Требования к современным системам связи и возможные пути их реализации // Материалы МНПК «Перспективы и темпы научного развития». – Тамбов, 2009. – С. 47-53.