

Семенов А.О.

Вінницький національний технічний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА КИЯШКА-ПІКОВСЬКОГО-РАБІНОВИЧА ЗА ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ХАОТИЧНИХ СИГНАЛІВ

У роботі наведено результати теоретичних досліджень і чисельного розрахунку статистичних та інформаційних параметрів хаотичних сигналів. Розглянуто генератор детермінованого хаосу типу Кияшко-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Отримано графічні залежності характеристикних показників Ляпунова автоколивальної системи генератора від її параметрів. Проведено чисельні розрахунки коефіцієнтів взаємної кореляції та автокореляції хаотичних сигналів. Отримано результати розрахунків ентропії та фрактальної розмірності генерованих хаотичних сигналів. Здійснено оптимізацію параметрів автоколивальної системи генератора по максимуму ентропії хаотичних сигналів.

Ключові слова: генератор, транзисторна структура, від'ємний опір, математична модель, хаотичний сигнал, показники Ляпунова.

Постановка проблеми. Упродовж трьох останніх десятиліть спостерігається зростаючий інтерес до пошуку нових методів і засобів побудови генераторів детермінованого хаосу для практичного застосування в радіоелектронних та інфокомунікаційних системах. Сьогодні відомо багато методів і способів передавання інформації за допомогою сигналів детермінованого хаосу [1, с. 38–42]. Це зумовлено тим, що хаотичні сигнали мають такі специфічні властивості [2]: 1) складність форми і неперіодичність; 2) широкосмуговість; 3) велику інформаційну ємність; 4) підвищену завадостійкість. Вітчизняні публікації в напрямі дослідження інформаційних параметрів і характеристик хаотичних сигналів відомі мало. Ще менше уваги приділено питанням розвитку теорії синтезу та оптимізації пристроїв генерування та формування сигналів детермінованого хаосу за критерієм максимальної інформаційної місткості. Це зумовлює актуальне науково-технічне завдання створенню нових і удосконалення відомих методів оптимізації існуючих генераторів детермінованого хаосу по максимуму інформаційних властивостей сигналів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо безліч публікацій, присвячених розробленню та дослідженню пристроїв генерування та формування сигналів детермінованого хаосу для практичного застосування в надширокосмугових радіоелектронних та інфокомунікаційних системах [3–5]. Детально опрацьовано питання синхронізації хаотичних генераторів для побудови систем передавання інформації [6]. Системи

передавання інформації за допомогою хаотичних сигналів базуються на здійсненні синхронізації між ведучою та веденою хаотичними автоколивальними системами [6]. Усі відомі системи передавання інформації можна поділити на такі групи залежно від видів синхронізації [6]: 1) повна синхронізація; 2) фазова синхронізація; 3) узагальнена синхронізація. У кожній із цих груп можуть бути застосовані такі способи передавання інформації за допомогою хаотичних сигналів [6]: хаотичне маскування (chaotic masking), перемикання хаотичних режимів (chaotic shift keying), нелінійне підмішування інформаційного сигналу до хаотичного (nonlinear signal mixing), застосування структури фазового автоматичного підстроювання (PLL), модуляція параметрів передавача у поєднанні з адаптивними методами приймання (adaptive methods). Для практичної реалізації зазначених способів передавання інформації потрібно оцінити відомі генератори детермінованого хаосу за статистичними та інформаційними параметрами сигналів. Результати інтегральної оцінки великої кількості (84) генераторів хаосу за кореляційними та спектральними властивостями сигналів наведені в роботі [2]. Водночас питання інтегральної оцінки інформаційних параметрів і властивостей генераторів детермінованого хаосу не розглянуто.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження статистичних та інформаційних параметрів автоколивальної системи транзисторного генератора Кияшко-Піковського-Рабіновича (далі – КПП) та оптимізація параметрів за критерієм максимуму ентропії хаотичних сигналів. Для

досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі завдання: 1) отримати спектр старших показників Ляпунова автоколивальної системи генератора залежно від її параметрів; 2) здійснити обчислення інформаційних і статистичних параметрів хаотичних сигналів; 3) здійснити оптимізацію режиму роботи генератора по максимуму ентропії хаотичних сигналів; 4) зробити висновки з проведеного дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У теорії інформації поняття ентропії введено для систем, які можуть знаходитися в різних станах x_i з різною ймовірністю $p_i = p(x_i)$ [7, стор. 67]. За Шенноном стан невизначеності інформаційної системи характеризується ентропією так [7, с. 67]:

$$H = -\sum_i p_i \log p_i. \quad (1)$$

Мірою інформації, яка міститься в повідомленні, є зміна ентропії [7, с. 67].

Крім класичної шеннонівської ентропії для аналізу інформаційних властивостей хаотичних систем застосовують узагальнену ентропію Реньї H_q порядку q [8, с. 1322]

$$H_q = \frac{1}{1-q} \log \left(\sum_i p_i^q \right). \quad (2)$$

Під час граничного переходу за умови $q \rightarrow 1$ рівняння (2) перетворюється до вигляду рівняння (1). Тобто ентропія Шеннона є частковим випадком узагальненої ентропії Реньї [8, с. 1322].

Аналіз стану генераторів детермінованого хаосу виконують методами фазової площини [3; 4]. Фазові портрети генераторів детермінованого хаосу в площинах і просторах динамічних змінних мають вигляд дивного атратора [3; 4]. Експоненціальне збільшення відстані двох початково близьких траєкторій визначається характеристичними показниками Ляпунова [7, с. 110]. Швидкість розходження великої кількості нескінченно близьких траєкторій визначається ентропією динамічної системи. Тобто ентропія – це кількість інформації, необхідна для визначення місця розташування системи у деякому її стані, тобто міра незнання о системі [7, с. 110].

Із загальної теорії систем динамічного хаосу відомі такі типи ентропії [7, с. 111–115]: 1) метрична (Колмогорова); 2) каскада (Колмогорова-Сіная); 3) узагальнена (ентропія Реньї); 4) топологічна.

Величина ентропії динамічної системи безпосередньо пов'язана з характеристичними показниками Ляпунова. При цьому від'ємні характеристичні показники Ляпунова не роблять внесок до загальної величини ентропії. Ентропія хаотичних систем визначається лише додатними показниками Ляпунова [7, с. 116]

$$H = \int_A \left[\sum_{\lambda_i(x) > 0} \lambda_i(x) \right] dA. \quad (3)$$

У рівнянні (3) здійснюється додавання усіх додатних характеристичних показників Ляпунова, а інтеграл береться по деякій інваріантній області фазового простору динамічної системи. Ентропія розуміється деякою характеристикою однієї стохастичної компоненти системи. У цьому разі характеристичні показники Ляпунова не залежать від траєкторії фазового портрету, а тому інтеграл у (3) дорівнює одиниці [7, с. 116]. Таким чином, величина ентропії Колмогорова-Сіная хаотичної системи визначається алгебраїчною сумою додатних характеристичних показників Ляпунова [8, с. 1322]

$$H = \sum_{\lambda_i(x) > 0} \lambda_i(x). \quad (4)$$

Поняття фрактальної розмірності тісно пов'язане з Ляпуновською розмірністю [7, с. 136], яка визначається за формулою

$$d_{L1} = j + \sum_{i=1}^j \frac{\lambda_i}{|\lambda_{j+1}|}, \quad (5)$$

де усі характеристичні показники Ляпунова впорядковані по зростанню

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n,$$

n – розмірність фазового простору, а число j – визначається з таких умов

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_j \geq 0, \quad \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{j+1} < 0. \quad (6)$$

Носіями інформації в інфокомунікаційних і телекомунікаційних системах є електричні сигнали. Під час оброблення хаотичних електричних сигналів важливими параметрами є коефіцієнти взаємної кореляції або автокореляції.

Під час статистичної обробки випадкових сигналів $X(t)$, які спостерігаються в проміжку часу від 0 до T застосовують наближену взаємну кореляційну функцію [9, с. 47]

$$R_{X1X2} = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x_1(t)x_2(t+\tau)dt, \quad (7)$$

при $0 \leq \tau \ll T$. Виконати аналітично інтегрування у (7) неможливо, тому обчислення здійснюють для випадку дискретних вибірок $x_1(t)$ і $x_2(t)$ випадкових процесів $X1(t)$ і $X2(t)$ [9, стор. 49]

$$R_{X1X2}(n\Delta t) = \frac{1}{N-n+1} \sum_{k=0}^{N-n} X1_k X2_{k+n}, \quad (8)$$

де Δt – крок вибірки, $n = 0, 1, 2, \dots, M$ і $M \ll N$.

Безрозмірний коефіцієнт взаємної кореляції розраховують по формулі [9, с. 49]

$$\rho = \frac{R_{X1X2}(\tau)}{\sigma_{X1}\sigma_{X2}}, \quad (9)$$

де σ_{X1} і σ_{X2} – це стандартні відхилення випадкових величин $X1(t)$ і $X2(t)$ відповідно.

Електрична схема генератора Кіяшко-Піковського-Рабіновича на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором наведена на рис. 1.

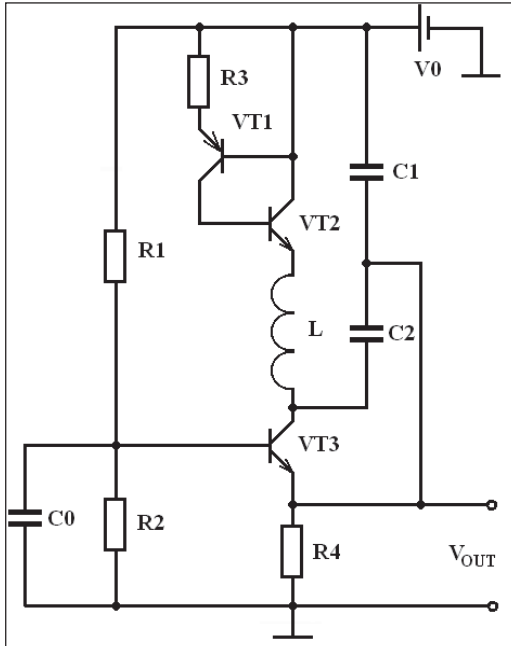


Рис. 1. Електрична схема генератора Кіяшко-Піковського-Рабіновича на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором

Математична модель динамічних процесів у генераторі має вигляд [10]

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = 2hx_1 + x_2 - gx_3 + dx_1 \cdot x_2^2, \\ \frac{dx_2}{d\tau} = -x_1, \\ \varepsilon \frac{dx_3}{d\tau} = x_1 - f(x_3), \end{cases} \quad (10)$$

де рівняння апроксимація статичної ВАХ біполярної транзисторної структури VT1-VT2 кубічним поліномом [10]

$$f(x_3) = -1.143 \cdot 10^{-3} + 6.972x_3 - 14.382x_3^2 + 7.439x_3^3, \quad (11)$$

рівняння нормованих змінних

$$x_1 = \frac{I}{I_m}, \quad x_2 = UI_m \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad x_3 = \frac{V}{V_m}, \quad (12)$$

рівняння коефіцієнтів системи

$$2h = R\sqrt{\frac{C}{L}}, \quad g = \frac{V_m}{I_m} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad \varepsilon = \frac{gC(V)}{C}, \quad C = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}, \quad \tau = \omega_0 t, \quad (13)$$

де I_m, V_m – параметри апроксимації статичної ВАХ транзисторної структури VT1-VT2; d – коефіцієнт, який урахує нелінійні властивості вихідних характеристик підсилювача на VT3 ($d = 0, 02 \dots 0, 03$).

Моделльне дослідження динамічних процесів у автоколивальній системі генератора КПП здійснено за допомогою програми DEREK [11]. Програма DEREK обчислює частину спектрів показників Ляпунова (не більше перших 4-х) використовуючи чисельний ітераційний алгоритм Бенеттіна [11].

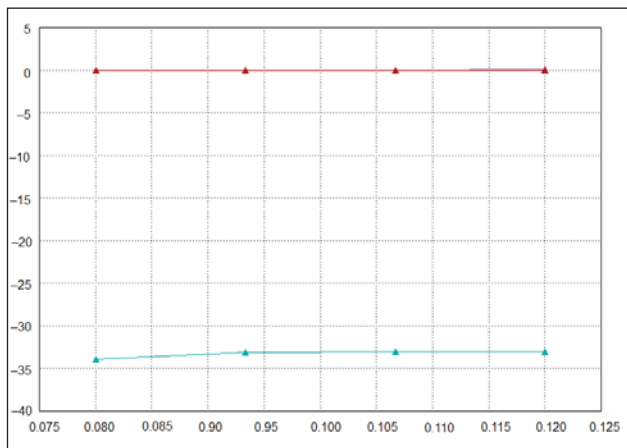
На рис. 2 наведено спектри показників Ляпунова залежно від зміни коефіцієнтів динамічної системи генератора КПП для режиму багатовиткового атрактора при параметрах коефіцієнтів системи $h=0.107$ і $g=0.957$. Як видно з рис. 2, максимальне значення старшого показника Ляпунова забезпечується при $h=0.115$ і $g=0.775$. За цих умов старші показники Ляпунова мають величини $\lambda_1=1.248745 \cdot 10^{-1}$, $\lambda_2=3.5648753 \cdot 10^{-2}$, $\lambda_3=-3.1117128 \cdot 10^1$.

Для динамічної системи третього порядку рівняння Ляпуновської розмірності (5) з урахуванням вимог (6) має вигляд

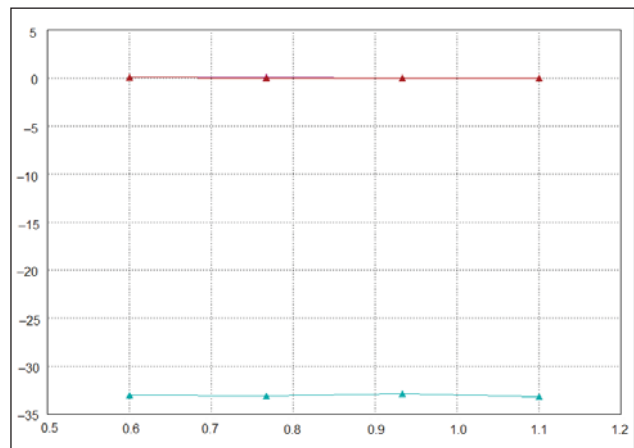
$$d_{L1} = 2 + \frac{\lambda_1}{|\lambda_3|} \quad (14)$$

і повністю збігається з фрактальною розмірністю d_F .

Ентропія Колмогорова-Сіная хаотичних сигналів оптимізованого генератора КПП на рис. 1 становить



а)



б)

Рис. 2. Графіки характеристичних показників Ляпунова при зміні коефіцієнтів система: а) $h=0.08 \dots 0.12$, б) $g=0.6 \dots 1.1$

$$H = \sum_{\lambda_i(x) > 0} \lambda_i(x) = \lambda_1 + \lambda_2 = 0.1605,$$

а фрактальна розмірність

$$d_F = d_{L1} = 2 + \frac{\lambda_1}{|\lambda_3|} = 2.004.$$

Коефіцієнти взаємної кореляції хаотичних сигналів оптимізованого генератора КПП на рис. 1 обчислено за допомогою стандартної функції corr (X1,X2) програми MathCad 15.0 і становлять

$$\rho(X1, X2) = 1.12206 \cdot 10^{-3}, \quad \rho(X1, X3) = 0.53444,$$

$$\rho(X2, X3) = -0.26089.$$

Висновки. У роботі отримано результати теоретичних досліджень і математичного моделювання автоколебальної системи генератора

Кияшка-Піковського-Рабиновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Отримано результати чисельних розрахунків статистичних та інформаційних параметрів генерованих хаотичних сигналів. У порівнянні з хаотичним генератором Колпитця [12], сигнали якого мають ентропію $H=0,1292$ і фрактальну розмірність $d_F=2,1123$, хаотичний генератор КПП на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором має кращі інформаційні властивості, але поступається як за частотним діапазоном, так і спектральними характеристиками. Як на переваги дослідженого хаотичного генератора КПП, слід зазначити його сумісність з інтегральною технологією та високим рівнем амплітуди генерованих хаотичних напруг і струмів.

Список літератури:

1. Бобало Ю.Я., Галюк С.Д., Климаш М.М., Політанський Р.Л. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях: монографія. Дрогобич – Львів: Коло, 2015. 184 с.
2. Голевич О.Б., Пивовар О.С., Троцишин І.В. Впорядкування ансамблів хаотичних сигналів та способи їх використання в над широкосмугових телекомунікаційних системах. Цифрові технології. 2015. Вип. 17. С. 182–192. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ct_2015_17_24
3. Генерация хаоса / Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.; под общ. ред. Дмитриева А.С. Москва: Техносфера, 2012. 424 с.
4. Шахтарин Б.И., Кобылкина П.И., Сидоркина Ю.А., Кондратьев А.В., Митин С.В. Генераторы хаотических колебаний: учебн. пособие. Москва: Гелиос АРВ, 2014. 248 с.
5. M. P. Kennedy, R. Rovatti, G. Setti. Chaotic Electronics in Telecommunications. London, CRC Press, 2000. 438 p.
6. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации. Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 12. С. 1281–1310. DOI: 10.3367/UFNr.0179.200912c.1281.
7. Шашихин В.Н. Хаос и нелинейная динамика. Регулярная и хаотическая динамика: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 210 с.
8. Лоскутов А.Ю. Очарование хаоса. Успехи физических наук. 2010. Том. 180, № 12. С. 1305–1329. DOI: 10.3367/UFNr.0180.201012c.1305.
9. Вохник О.М., Зотов А.М., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. Моделирование и обработка стохастических сигналов и структур. Учебное пособие. Москва: Университетская книга, 2013. 125 с.
10. Семенов А.О. Генератор детерминированного хаоса Кияшко-Піковського-Рабиновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2017. № 3. С. 76–82.
11. DEREK-ODE – Исследование динамических систем. URL: <http://derek-ode.syto.com/>
12. Семенов А.О. Транзисторні генератори детермінованого хаосу за схемою Копитця. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2017. № 1. С. 223–232.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА КИЯШКО-ПИКОВСКОГО-РАБИНОВИЧА ПО ИНФОРМАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В работе приведены результаты теоретических исследований и численного расчета статистических и информационных параметров хаотических сигналов. Рассмотрен генератор детерминированного хаоса типа Кияшко-Піковського-Рабиновича на основе биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Получены графические зависимости показателей Ляпунова автоколебательной системы генератора от ее параметров. Проведены многочисленные расчеты коэффициентов взаимной корреляции и автокорреляции хаотических сигналов. Получены результаты расчетов энтропии и фрактальной размерности генерируемых хаотических сигналов. Осуществлена оптимизация параметров автоколебательной системы генератора по максимуму энтропии хаотических сигналов.

Ключевые слова: генератор, транзисторная структура, отрицательное сопротивление, математическая модель, хаотический сигнал, показатели Ляпунова.

**KIYASHKO-PIKOVSKY-RABINOVICH TRANSISTOR OSCILLATOR OPTIMIZATION
BY INFORMATION PARAMETERS OF CHAOTIC SIGNALS**

The paper presents the theoretical research and numerical calculation results for statistic and information parameters of chaotic signals. A deterministic chaos oscillator of Kiyashko-Pikovsky-Rabinovich type based on a transistor structure with negative resistance has been considered. Graphical dependences for Lyapunov characteristic exponents of the self-oscillatory system on its parameters have been obtained. Cross and auto-correlation coefficients of chaotic signals have been numerically calculated. Entropy and fractal dimensionality of the generated chaotic signals have been calculated. The self-oscillatory system parameters have been optimized by the entropy maximum of chaotic signals.

Key words: oscillator, transistor structure, negative resistance, mathematical model, chaotic signal, Lyapunov exponents.