

УДК 621.397

А.О. СЕМЕНОВ

Вінницький національний технічний університет

ТРАНЗИСТОРНІ ГЕНЕРАТОРИ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ ДЛЯ ЗАСОБІВ ПРИХОВАНОЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Анотація. Запропоновано новий варіант генератора детермінованого хаосу для застосування в засобах прихованої передачі інформації. Принцип дії такого генератора полягає у використанні нелінійних властивостей транзисторної структури з від'ємним опором. Показано, що динаміка коливань нелінійної системи близька до хаотичного режиму генератора Колпितця. Отримано результати теоретичних і експериментальних досліджень.

Ключові слова. Детермінований хаос, транзисторна структура, від'ємний опір, фазовий портрет, амплітудний спектр.

A.O. SEMENOV

Vinnytsia National Technical University

DETERMINISTIC CHAOS TRANSISTOR OSCILLATORS FOR HIDDEN INFORMATION TRANSMISSION FACILITIES

Abstract. The new version of a deterministic chaos oscillator for application in hidden information transmission facilities is presented. The principle of operation for such oscillator is to use nonlinear properties of a transistor structures with negative resistance. The dynamics of nonlinear system oscillation is shown to be close to a chaotic mode of the Colpitts oscillator. The results of theoretical and experimental researches are obtained.

Keywords. Deterministic chaos, transistor structure, negative resistance, phase portrait, amplitude spectrum.

Вступ

Останнім часом з метою забезпечення конфіденційності інформації в системах зв'язку та підвищення їхньої завадостійкості широко застосовують інформаційні властивості детермінованого хаосу [1]. Застосування хаотичних коливань у системах зв'язку крім підвищення завадостійкості кодування та захисту інформації від несанкціонованого доступу мають ще такі переваги [2]: 1) сигнали детермінованого хаосу мають потенційно більш високу інформаційну ємність при малому рівні сигналу внаслідок широкосмуговості; 2) завдяки фундаментальному явищу хаотичної синхронізації в певних системах зв'язку не потрібно додаткових схем керування для синхронізації передавача та приймача; 3) висока безпека системи зв'язку, оскільки захищеність інформації здійснюється на апаратному рівні з урахуванням того, що на приймальній стороні потрібно відновити динаміку передавальної хаотичної системи [3-5]. Тому актуальною науково-технічною задачею є розробка та дослідження високочастотних генераторів детермінованого хаосу для засобів прихованої передачі інформації.

Перспективним напрямком приладобудування є розробка та дослідження електрично керованих транзисторних генераторів детермінованого хаосу, сумісних з мікроелектронною технологією [6]. При цьому основними науково-технічними задачами є синхронізація та підвищення стійкості генераторів детермінованого хаосу [6,7]. Для розв'язку цих задач потрібно отримати фазові портрети генераторів детермінованого хаосу, а також часові та частотні залежності хаотичних коливань. Метою роботи є огляд математичних моделей та фазових портретів транзисторних генераторів детермінованого хаосу, які побудовані з використанням ємнісного ефекту транзисторних схем і структур. Також у роботі наведено результати експериментального дослідження розробленого генератора детермінованого хаосу на біполярно-польовій транзисторній структурі з від'ємним опором.

Транзисторний генератор детермінованого хаосу за схемою Колпितця

Більшість відомих транзисторних генераторів детермінованого хаосу є низькочастотними (до 10..20 МГц). Сучасні системи зв'язку потребують більш високочастотних генераторів багаточастотних і широкосмугових сигналів. Серед високочастотних транзисторних генераторів детермінованого хаосу найбільш простою і зручною є схема Колпितця, яка подана на рис. 1 [6].

Схема Колпितця є класичним варіантом ємнісної тригачкової схеми генераторів і має один активний нелінійний елемент – біполярний транзистор. Зворотний зв'язок генератора утворений котушкою індуктивністю L (з опором активних втрат R_1) та подільником напруги з ємностей C_1 і C_2 . Робоча точка на сімействі ВАХ біполярного транзистора встановлюється вибором напруги джерела V_0 та номіналу опорів базового подільника напруги R_1R_2 . У деяких випадках між колектором і базою біполярного транзистора встановлюють додаткову ємність C для розширення можливості керування коливальними режимами генератора [6].

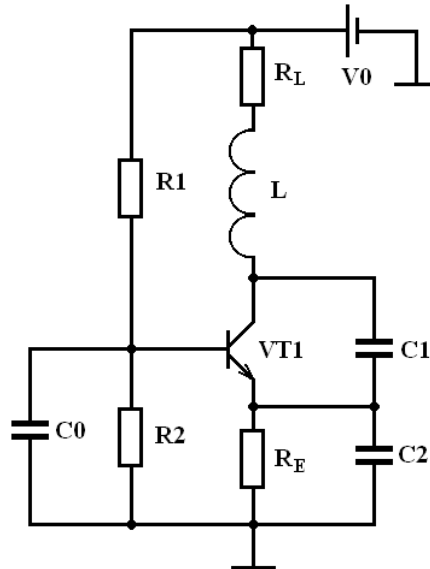


Рис. 1. Електрична схема генератора Колпिटця

Основна частота генерованого сигналу [6]

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \quad (1)$$

У режимі великого сигналу, що має місце на практиці при виникненні хаотичних коливань, модель біполярного транзистора зручно звести до вигляду двосегментного кусково-лінійного резистора, який керується напругою, і лінійного джерела струму, який керується струмом, вигляду [6]

$$I_B = \begin{cases} 0, & V_{BE} \leq V_0, \\ (V_{BE} - V_0)/R, & V_{BE} > V_0, \end{cases} \quad (2)$$

де V_0 - порогова напруга емітерного р-п переходу, R - опір емітерного р-п переходу в режимі малого сигналу, V_{BE} - напруга база-емітер.

Динаміка фізичних процесів у схемі генератора Колпिटця на рис. 1 описується системою диференціальних рівнянь у безрозмірних змінних вигляду [7]

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 - a \cdot F(x_3), \\ \frac{dx_2}{dt} = c - x_1 - bx_2 - x_3, \\ \varepsilon \frac{dx_3}{dt} = x_2 - dx_3, \end{cases} \quad (3)$$

де $F(z)$ - функція апроксимації колекторного струму залежно від вхідної напруги, яка в нормованих змінних має вигляд

$$F(z) = \begin{cases} e^{-1-z}, & z < e-1, \\ 0, & z \geq e-1. \end{cases} \quad (4)$$

Рівняння нормованих змінних і коефіцієнтів системи (3) мають вигляд [7]

$$\begin{aligned} x_1 = \frac{V_{C1}}{V^*}, \quad x_2 = \frac{\rho I_L}{V^*}, \quad x_3 = \frac{V_{C2}}{V^*}, \quad v = \frac{t}{\tau}, \quad \dot{u} \equiv \frac{du}{dv}, \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C_1}}, \\ \tau = \sqrt{LC_1}, \quad \varepsilon = \frac{C_2}{C_1}, \quad a = \frac{\rho}{r}, \quad b = \frac{R}{\rho}, \quad c = \frac{V_0}{V^*}, \quad d = \frac{\rho}{R_E}, \quad e = \frac{R_2}{R_1 + R_2} c. \end{aligned} \quad (5)$$

У роботі [7] наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень генератора сигналів детермінованого хаосу за схемою Колпिटця на біполярному транзисторі 2N3904 із такими параметрами пасивних елементів: $L = 850$ мкГн, $C_1 = C_2 = 470$ нФ, $C_0 = 47$ мкФ, $R = 36$ Ом, $R_E = 510$ Ом, $R_1 = R_2 = 3$ кОм, $V_0 = 15$ В. У такому разі значення нормованих змінних системи звичайних диференціальних рівнянь (3) за умови (5): $\varepsilon = 1$, $a = 30$, $b = 0.8$, $c = 20$, $d = 0.08$, $e = 10$. На рис. 2 (а-г) наведено фазові портрети генератора Колпिटця у різних площинах змінних, отриманих при чисельному моделюванні системи (3) за умов (5) в програмі MathCad 15.0 згідно з методикою [8-9]. На рис. 3 наведено часові діаграми, на рис. 4 амплітудо-частотні спектри та на рис. 5 фазочастотні спектри змінних x_1 - x_2 - x_3 .

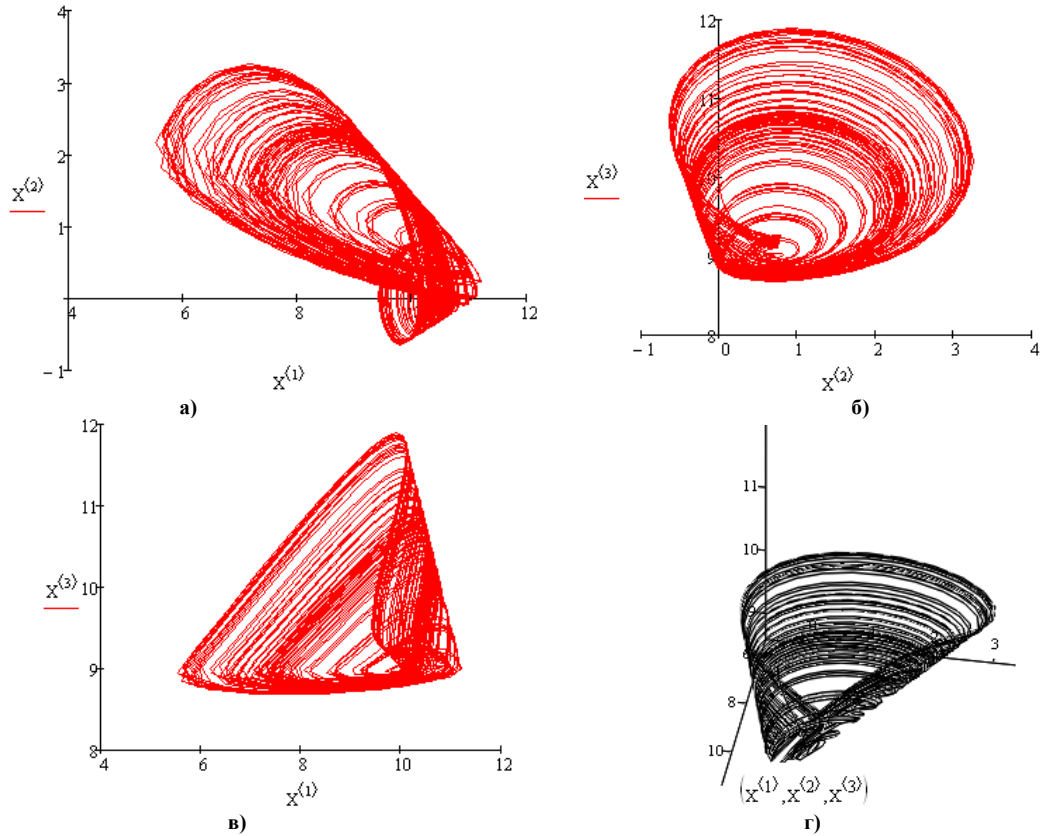


Рис. 2. Фазові портрети генератора Колпिटця у просторі змінних: а) x_1-x_2 , б) x_2-x_3 , в) x_1-x_3 , і г) $x_1-x_2-x_3$

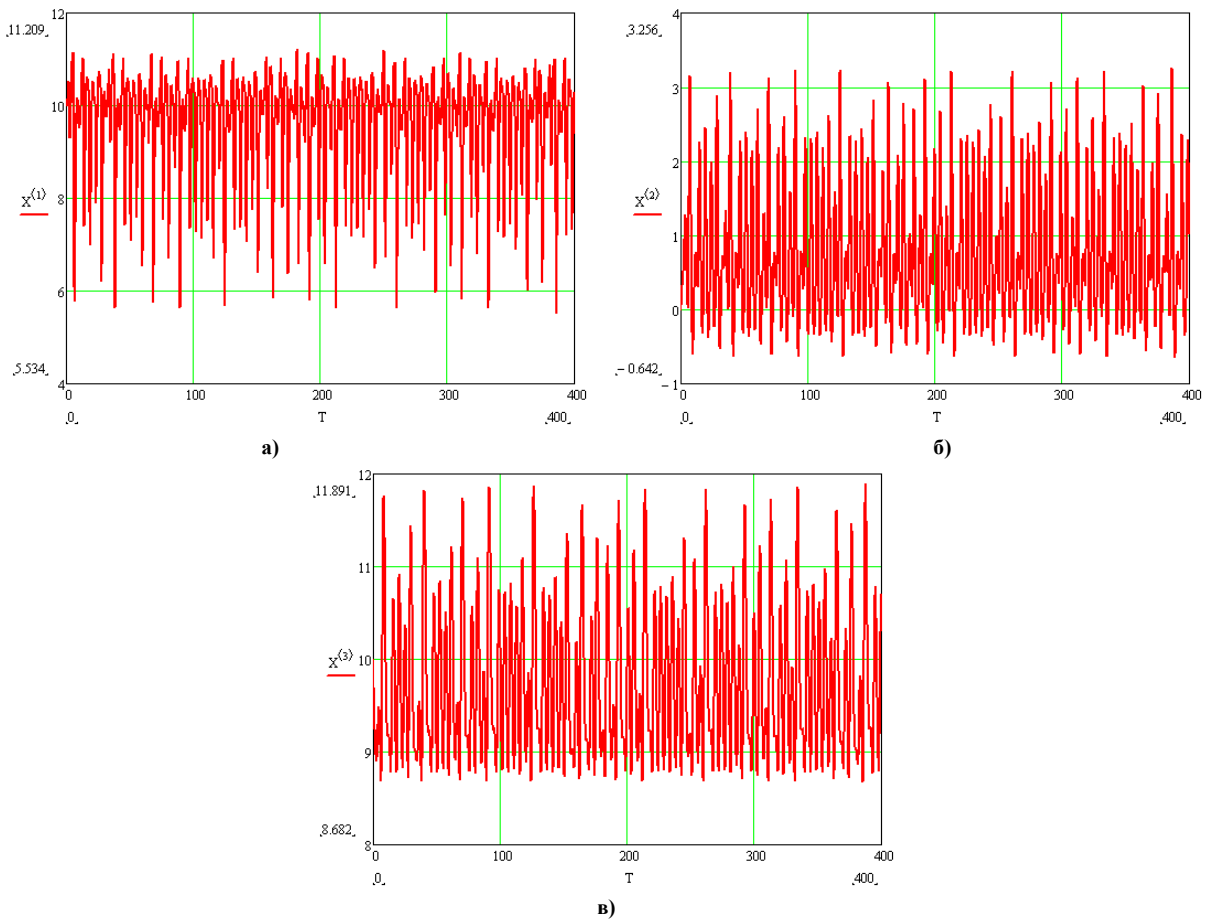


Рис. 3. Часові діаграми хаотичних сигналів генератора Колпिटця ($T = \omega_0 t$ – нормований час)

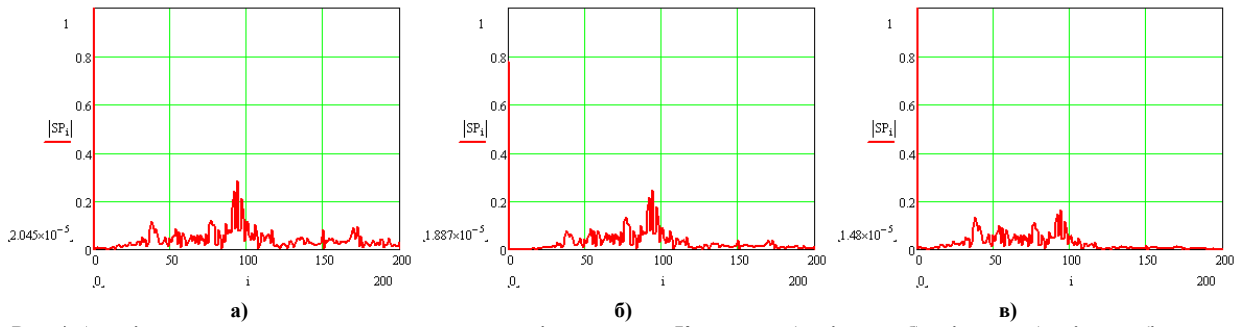


Рис. 4. Амплітудо-частотний спектр хаотичних сигналів генератору Колпіття: а) змінна x_1 , б) змінна x_2 , в) змінна x_3 (i – номер гармоніки)

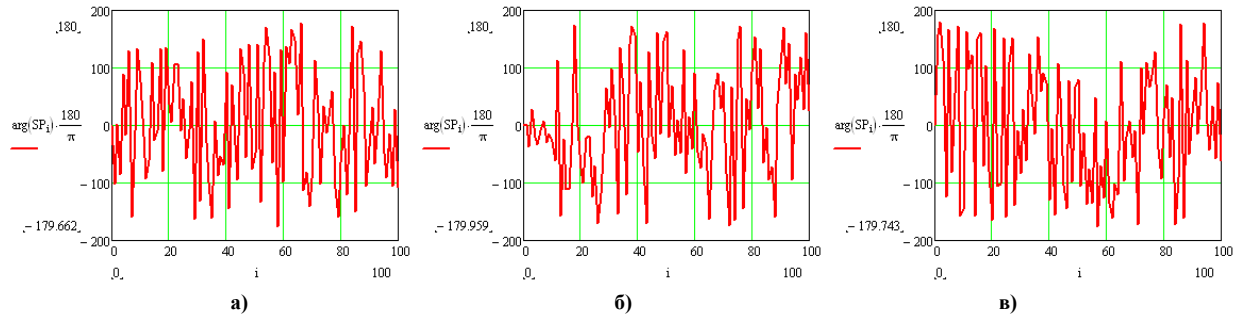


Рис. 5. Фазочастотний спектр хаотичних сигналів генератору Колпіття: а) змінна x_1 , б) змінна x_2 , в) змінна x_3 (i – номер гармоніки)

Генератор детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від’ємним опором

На рис. 6 наведено розроблену електричну принципову схему генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від’ємним опором. У схемі на рис. 6 використано такі елементи: VT1 – КТ363, VT2 – КП327, C1 – 3,3 нФ, C2 – 47 пФ, C3 – 2 мкФ, R1 – 560 Ом, R2 – 47 Ом, L – 120 мкГн.

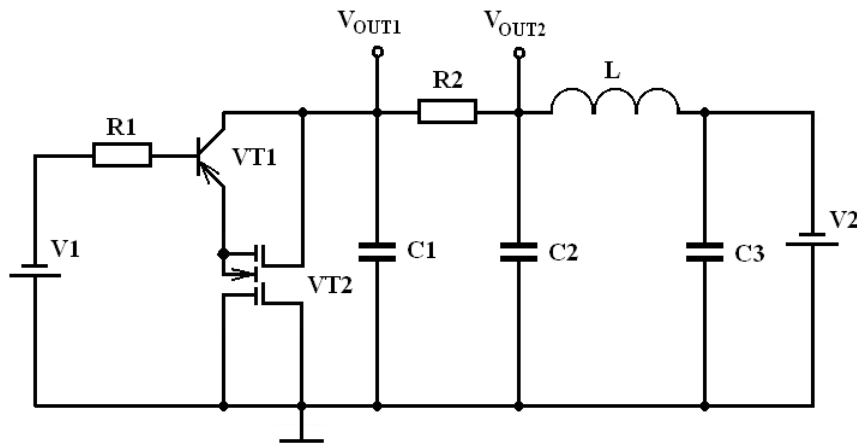


Рис. 6. Електрична схема генератору детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури

Генератор працює таким чином. Активний елемент генератора на основі дискретних транзисторів – біполярного р-п-р типу і двозатворного МДН транзистора з індукованим каналом п типу – має сімейство статичних ВАХ λ -типу. Вибір активного елементу генератору здійснено на підставі міркувань отримання максимальної протяжності спадної ділянки ВАХ при зміні напруг V1 і V2. З метою усунення впливу нелінійних властивостей ємнісної складової активному елементу генератору паралельно включено конденсатор C1. Базові схемотехнічні рішення генераторів електричних коливань на основі транзисторних структур з від’ємним опором являють собою коливальні системи з 1 ступенем вільності [10-11]. Для отримання коливальної системи з 1,5 ступенем вільності та забезпечення хаотичного режиму в генераторі додано коло R2C2.

У широкому діапазоні напруг генератор працює в стаціонарному режимі коливань осциляторного типу. Хаотичний режим виникає при напругах джерел V1=3,0 В, V2=5,3 В. На рис. 7 – рис. 9 наведено отримані результати експериментальних досліджень генератору детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від’ємним опором. Як вихідні сигнали генератору використовувалися напруги на конденсаторах C1 і C2 (нормовані змінні x_1 і x_3). Як видно з рис. 7 і рис. 2, в фазові портрети обох генераторів в площині змінних генерованих напруг (площині змінних x_1 - x_3) мають схожість.

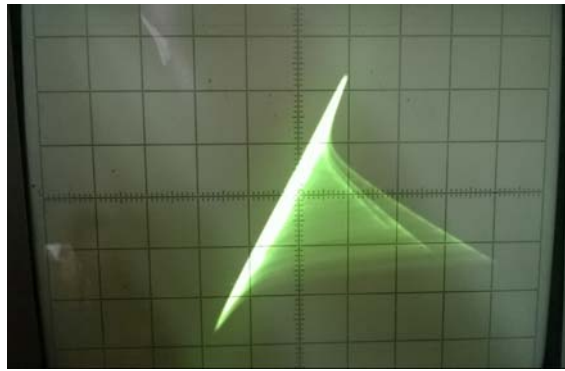


Рис. 7. Фазовий портрет генератору детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури в площині змінних



Рис. 8. Осцилограма хаотичних коливань генератору на основі біполярно-польової транзисторної структури



Рис. 9. Осцилограма та амплітудо-частотний спектр хаотичних коливань генератору

Висновки

У роботі проведено огляд математичних моделей та фазових портретів транзисторних генераторів детермінованого хаосу, які побудовані за схемою Колпитця. Запропоновано нове схемотехнічне рішення генератору детермінованого хаосу на основі емнісного ефекту біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором. Отримано результати експериментальних досліджень хаотичного режиму такого генератору. Показано, що динаміка фізичних процесів у цьому генераторі близька до хаотичного режиму генератору Колпитця, але, на відміну від останнього, амплітудо-частотний спектр сигналу детермінованого хаосу в запропонованому генераторі має більш рівномірний розподіл енергії по спектральним складовим. Розроблений генератор призначений для застосування в засобах прихованої передачі інформації.

Література

1. Дмитриев А. С. Динамический хаос: Новые носители информации для систем связи / А. С. Дмитриев, А. И. Панас. – М.: Физматлит, 2002. – 251 с.
2. Жалнин А. Ю. Новая схема передачи информации на основе фазовой модуляции несущего хаотического сигнала / А. Ю. Жалнин // Изв. вузов «Прикладная нелинейная динамика». – 2014. – т. 22, № 5. – С. 3-12.
3. Патент № 2295835 (РФ), МКИ Н04L9/12, Н04К1/02. Способ секретной передачи информации / Короновский А. А., Москаленко О. И., Попов П. В., Храмов А. Е. // Заявл.: 2005133906/09, 03.11.2005; Опубл.: 20.03.2007, Бюл. № 8. – 10 с.
4. Патент № 2421923 (РФ), МКИ Н04L9/22. Способ скрытой передачи информации с изменяющимися характеристиками генератора шума / Москаленко О. И., Короновский А. А., Храмов А. Е. // Заявл.: 2010104117/09, 10.02.2010; Опубл.: 20.06.2011 Бюл. № 17. – 9 с.
5. Патент № 2509423 (РФ), МКИ Н04L9/00, G06F21/60. Способ скрытой передачи информации /

Москаленко О. И., Фролов Н.С., Короновский А. А., Храмов А. Е. Заявл.: 2012118774/08, 04.05.2012; Оpubл.: 10.03.2014 Бюл. № 7. – 11 с.

6. Генераторы хаотических колебаний: Учебное пособие. 2-е издание / [Б. И. Шахтарин, П. И. Кобылкина, Ю. А. Сидоркина, А. В. Кондратьев, С. В. Митин]. – М.: Гелиос АРВ, 2014. – 248 с.

7. Antanas Cenys, Arunas Tamasevicius, Antanas Baziliauskas, Romanas Krivickas, and Erik Lindberg. Hyperchaos in coupled Colpitts oscillators. – Journal Chaos, Solitons and Fractals, Vol. 17, 2003. – pp. 349-353.

8. Andriy Semenov. The Van der Pol's Mathematical Model of the Voltage-Controlled Oscillator Based on a Transistor Structure With Negative Resistance / Andriy Semenov // Proceedings of the XIII International Conference "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science", Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016. – pp. 100-104.

9. Andriy Semenov. Reviewing the mathematical models and electrical circuits of deterministic chaos transistor oscillators / Andriy Semenov // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Moscow: National Research University "Higher School of Economics". Russia, Moscow, May 12–14, 2016. IEEE Catalog Number: CFP16794-CDR. Online ISSN: 2380-6516.

10. Andriy Semenov. Quasi-linear mathematical model of generators on the basis of transistor structures with negative resistance - Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, 2009, № 4. – pp. 1-9.

11. Осадчук В. С. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 336 с.

References

1. Dmitriev A. S. Dinamicheskiy khaos: Novye nositeli informatsii dlya sistem svyazi / A. S. Dmitriev, A. I. Panas. – Moskva, Fizmatlit, 2002. – 251 s.

2. Zhalnin A. Yu. Novaya skhema peredachi informatsii na osnove fazovoy modulyatsii nesushchego khaoticheskogo signala / A. Yu. Zhalnin // Izv. Vuzov "Prikladnaya nelineynaya dinamika". – 2014. – Vol. 22, No5. – ss. 3-12.

3. Patent № 2295835 (RF), MKI H04L9 / 12, H04K1 / 02. Sposob sekretnoy peredachi informatsii / Koronovskii A. A., Moskalenko O. I., Popov P. V., Khramov A. E. // Zayav.: 2005133906/09, 03.11.2005; Opubl.: 20.03.2007, Byul. № 8. – 10 s.

4. Patent № 2421923 (RF), H04L9 / 22 MKI. Sposob skrytoy peredachi informatsii s izmenyayushchimisya kharakteristikami generatora shuma / O. I. Moskalenko, A.A. Koronovskiy, A. E. Khramov // Zayav.: 2010104117/09, 10.02.2010; Opubl.: 20.06.2011 Byul. № 17. – 9 s.

5. Patent № 2509423 (RF), MCI H04L9 / 00, G06F21 / 60. Sposob skrytoy peredachi informatsii / O.I. Moskalenko N.S. Frolov, A.A. Koronovskiy, A.E. Khramov // Zayav.: 2012118774/08, 04.05.2012; Opubl.: 10.03.2014 Byul. № 7. – 11 s.

6. Generatory khaoticheskikh kolebaniy: Uchebnik. 2nd edition / [B.I. Shakhtarin, P.I. Kobylkin, Y. Sidorkina, A.V. Kondratyev, S. Mitin]. – Moskva, Gelios ARV, 2014. – 248 s.

7. Antanas Cenys, Arunas Tamasevicius, Antanas Baziliauskas, Romanas Krivickas, and Erik Lindberg. Hyperchaos in coupled Colpitts oscillators. – Journal Chaos, Solitons and Fractals, Vol. 17, 2003. – pp. 349-353.

8. Andriy Semenov. The Van der Pol's Mathematical Model of the Voltage-Controlled Oscillator Based on a Transistor Structure With Negative Resistance / Andriy Semenov // Proceedings of the XIII International Conference "Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science", Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016. – pp. 100-104.

9. Andriy Semenov. Reviewing the mathematical models and electrical circuits of deterministic chaos transistor oscillators / Andriy Semenov // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Moscow: National Research University "Higher School of Economics". Russia, Moscow, May 12–14, 2016. IEEE Catalog Number: CFP16794-CDR. Online ISSN: 2380-6516.

10. Andriy Semenov. Quasi-linear mathematical model of generators on the basis of transistor structures with negative resistance - Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, 2009, № 4. – pp. 1-9.

11. V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, A. O. Semenov. Funktsionalni vuzly radiovimiryuvalnih pryladiv na osnovi reaktivnykh vlastivostey transistornykh struktur s vidyemnym oporom: monografiya. – Vinnytsia: VNTU, 2011. – 336 s.

Рецензія/Peer review : 12.5.2016 р.

Надрукована/Printed :27.6.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією