

УДК 535.14

Храпко С.М., аспірант; Шпатар П.М., к.т.н.; Політанський Л.Ф., д.т.н.

## МОДИФІКОВАНИЙ НЕАВТОНОМНИЙ ГЕНЕРАТОР ХАОТИЧНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ СХЕМИ ЧУА

**Khrapko S.M., Shpatar P.M., Politansky L.F. Modified nonautonomous chaotic signal generator based on Chua's scheme.**

Implementation nonautonomous chaotic generator based on the Chua circle using two operational amplifiers of type AD712 is presented. The properties of nonautonomous generator of deterministic chaotic fluctuations, which can be used in systems of transmitting information using chaos are analysed. Simulated circuit in Multisim environment presented phase portrait, and time dependent signals. There have been conducted using mathematical modeling on Wolfram Mathematica. Simulated in Wolfram Mathematica bifurcation diagrams, and presented their appearance depending on the size of the external signal. Presented spectrum received chaotic signal. As seen from below, the result of simulation and practical results are the same. Experimental results and modelling, that confirm the possibility of the scheme are shown.

**Keywords:** Chaos, Chua's circuit, nonlinear dynamics, nonautonomous chaotic generator.

**Храпко С.М., Шпатар П.М., Політанський Л.Ф. Модифікований неавтономний генератор хаотичних сигналів на основі схеми Чуа.**

Представлена практична реалізація неавтономного хаотичного генератора на основі кола Чуа з використанням двох операційних підсилювачів типу AD712. Проаналізовані властивості неавтономного генератора детермінованих хаотичних коливань, які можуть бути використані в системах передачі інформації з використанням хаосу. Приведені експериментальні результати та моделювання, які підтверджують властивості схеми.

**Ключові слова:** Хаос, коло Чуа, нелінійна динаміка, неавтономний генератор хаосу.

**Храпко С.М., Шпатар П.М., Политанский Л.Ф. Модифицированный неавтономный генератор хаотических сигналов на основе схемы Чуа.**

Представлена практическая реализация неавтономного хаотического генератора на основе цепи Чуа с использованием двух операционных усилителей типа AD712. Проанализированы свойства неавтономного генератора детерминированных хаотических колебаний, которые могут быть использованы в системах передачи информации с использованием хаоса. Приведены экспериментальные результаты и моделирования, подтверждающие свойства схемы.

**Ключевые слова:** Хаос, цепь Чуа, нелинейная динамика, неавтономный генератор хаоса.

### Вступ

Проблемою сьогодення є захисту інформації яка передається по системах зв'язку і запобігання прослуховування чи перехоплення розмов, як в телефонній апаратурі, так і захист об'єктів інфраструктури від кібератак [1].

Умовою швидкого розвитку інформаційних технологій і вдосконалення технічних засобів оброблення, передавання та зберігання інформації є розроблення нових технічних засобів для забезпечення конфіденційності інформації [2]. Перспективним в даному напрямку є використання детермінованого хаосу в телекомунікаційних та інформаційних системах.

Детермінований хаос є складним неперіодичним процесом, порушений нелінійними системами. Для використання детермінованого хаосу в радіотехніці і телекомунікаційних системах, необхідно створити джерела хаотичних коливань, що можуть контролюватися зміною значень параметрів нелінійних систем.

Дослідження нелінійних електронних схем є основою для встановлення фундаментальних механізмів, обумовлюють виникнення хаосу [3]. Різноманітність нелінійних електронних схем, автономних і неавтономних, що генерують хаос описані [4-10]. Метою даної роботи є дослідження практичної реалізації модифікованого неавтономного генератора хаотичних сигналів.

© Храпко С.М., Шпатар П.М., Політанський Л.Ф., 2017

Неавтономні хаотичні генератори є новим напрямком розроблення засобів генерування детермінованого хаосу і на даний час залишаються мало дослідженими. Причиною обмеження їх використання є сильна залежність робочих характеристик неавтономних генераторів від форми і параметрів сигналів зовнішнього генератора [11,12].

Неавтономні генератори хаотичних сигналів формують клас кіл, що генерують хаос під дією зовнішніх параметрів джерела [13]. Неавтономні генератори хаотичних сигналів володіють унікальними хаотичними властивостями, що є не притаманними автономним хаотичним генераторам. Ефективність неавтономних генераторів хаотичних сигналів залежить від якості використовуваного задаючого генератора. Точки рівноваги неавтономних систем можуть керуватися синусоїдою, зі змінною амплітудою і частотою, синусоїди.

### 1. Моделювання неавтономного генератора хаотичних сигналів в системі комп'ютерної алгебри Wolfram Mathematica

Математичною моделлю, що описує поведінку схеми (рис. 1) є неавтономна система нелінійних диференційних рівнянь третього порядку.

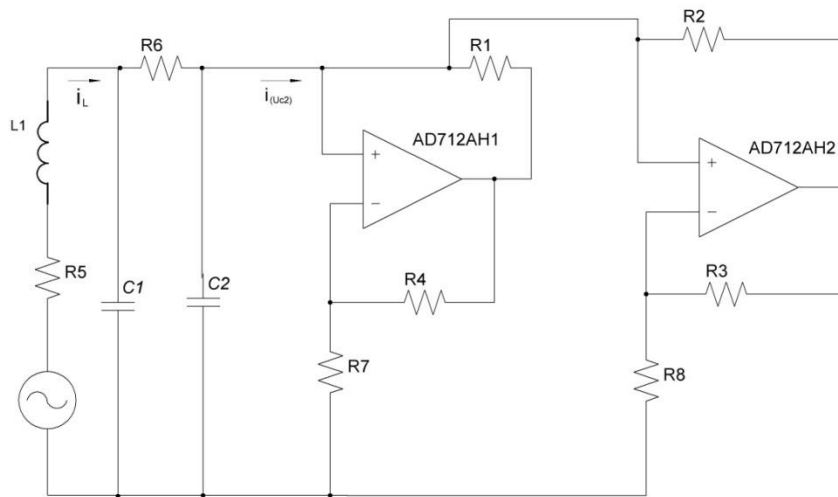


Рис. 1. Схема модифікованого неавтономного генератора хаотичних сигналів

Досліджена математична модель неавтономного генератора на основі схеми Чуа є система диференційних рівнянь, що базується на застосуванні законів Кірхгофа для його електронного кола (1).

$$\begin{aligned} C_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} &= \frac{U_{C_1} - U_{C_2}}{R_6} - i(U_{C_2}), \\ C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} &= i_L - \frac{U_{C_1} - U_{C_2}}{R_6}, \\ L \frac{di_L}{dt} &= -U_{C_1} - U_{ext} - i_L R_5. \end{aligned} \quad (1)$$

Виконаємо перетворення до безрозмірних змінних (2):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt'} = \alpha(y - x - f(x)), \\ \frac{dy}{dt'} = x - y + z, \\ \frac{dz}{dt'} = -\beta(y + U) - \gamma z. \end{cases} \quad (2)$$

де:

$$x = \frac{U_{C_2}}{E}; \quad y = \frac{U_{C_1}}{E}; \quad z = \frac{i_L(C_2)R_6}{E}$$

де:  $E$  – точка перегину;

$$U = U_0 \sin 2\pi ft.$$

Процеси в схемі Чуа визначаються значеннями двох основних параметрів: параметрів  $\alpha$ , та  $\beta$ . Постійна часу  $\gamma$  визначається інерцією кола.

$$\alpha = \frac{C_1}{C_2}; \quad \beta = \frac{R_6^2 C_1}{L};$$

Постійна часу  $\gamma$  характеризується інерційністю  $LC$  кола.

$$\gamma = \frac{R_5 C_1}{L}$$

Запишемо безрозмірну характеристику активного елемента у вигляді (3):

$$f(x) = m_1 x - \frac{1}{2}(m_0 - m_1)[|x+1| - |x-1|] \quad (3)$$

де:  $m_0$  та  $m_1$  – безрозмірні одиниці.

Режими хаотичних коливань, залежності від значень параметрів неавтономної схеми Чуа, та вигляд вольт-амперної характеристики нелінійного елемента, отримані в результаті моделювання неавтономного генератора хаотичних сигналів у системі комп'ютерної алгебри Wolfram Mathematica приведені на рис. 2 та рис. 3 відповідно.

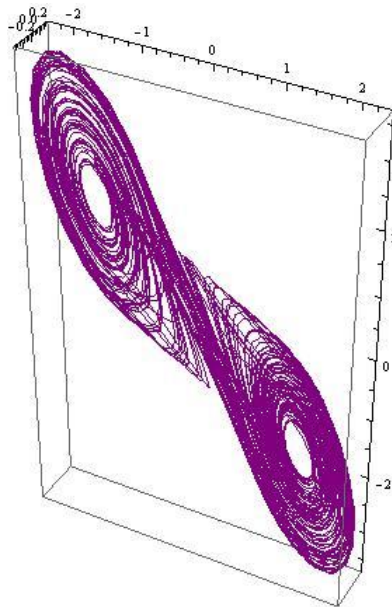


Рис. 2. Вигляд хаотичного атратора отриманого в результаті моделювання неавтономного генератора хаотичних сигналів на основі схеми Чуа у середовищі Mathematica

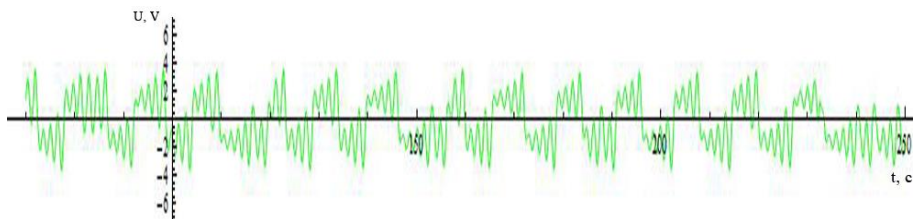


Рис. 3. Часова залежність неавтономного генератора хаотичних сигналів на основі схеми Чуа у середовищі Mathematica

Результати моделювання діаграм біфуркацій, при різних значеннях напруги зовнішнього сигналу збудження приведені на рис. 4.

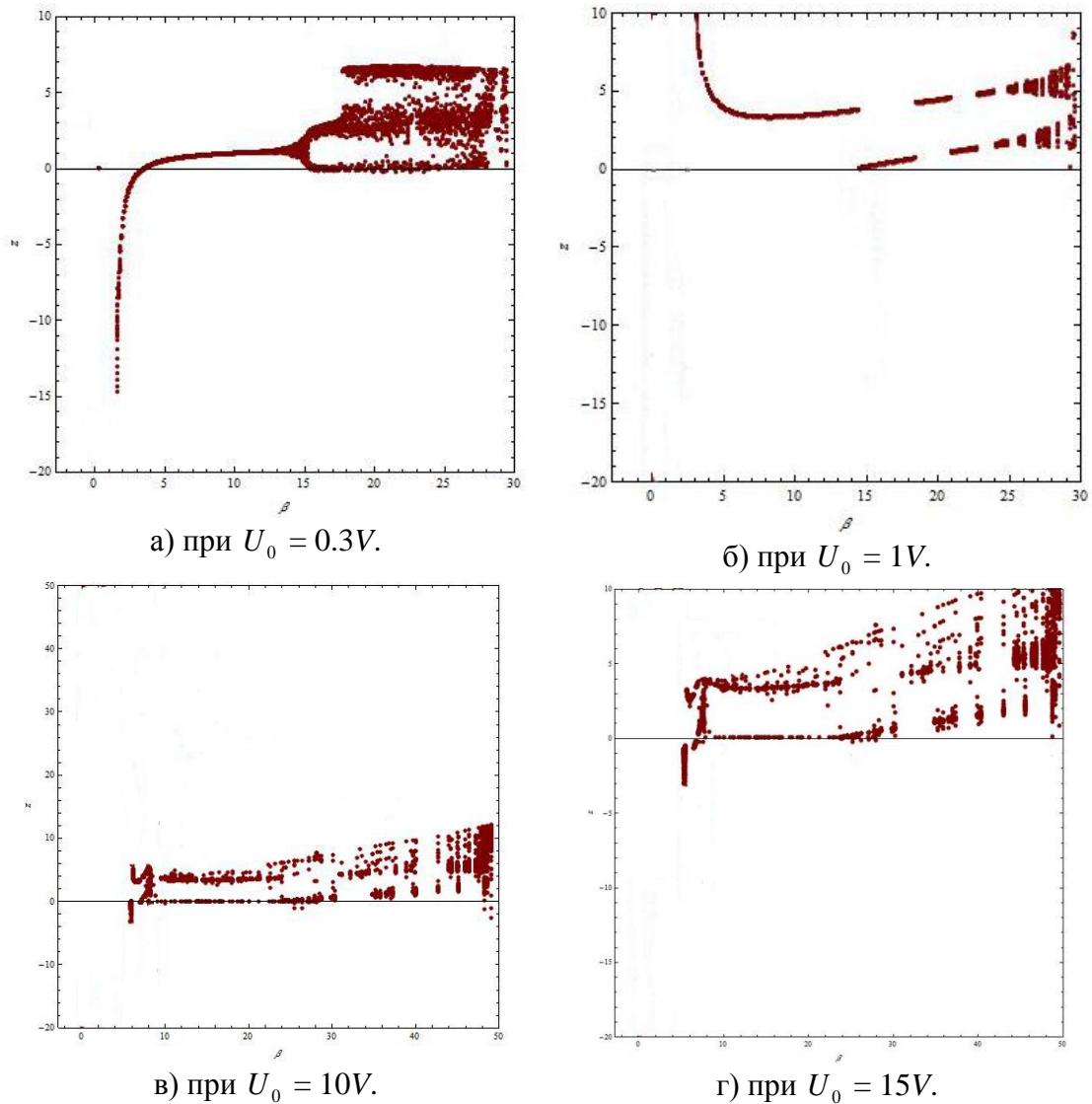


Рис. 4. Біфуркаційні діаграми неавтономного генератора хаотичних сигналів

Із отриманих результатів слідує, що у порівнянні зі звичайним генератором Чуа, у даній схемі реалізовано розгалуження біфуркаційних гілок, що вказує на розширення простору керуючих параметрів для реалізації хаотичних коливань. Біфуркаційні діаграми свідчать, про наявність хаотичних процесів та наявність атратора типу «подвійна прокрутка».

## 2. Практична реалізація генератора

Неавтономні хаотичні генератори описуються системою нелінійних диференційних рівнянь, що містять в правій частині періодичну рушійну силу  $f(t)$  (так зване збудження) [14]. Модель автономного генератора хаотичних сигналів такого типу достатньо описана в [15].

В [16] зазначається, що система Чуа містить коливну ланку у вигляді одиночного контура  $rLC$  з втратами, інерційну ланку  $RC$  і активний нелінійний елемент. Атрактивний характер хаотичних траєкторій зумовлений розсіюванням енергії на пасивному елементі  $R$ , що обмежує його наростання. Проте, баланс енергії є досить тонкою межею і, що він неперервно змінюється в часі, ніколи не повторюється як періодичне явище.

Операційні підсилювачі, що застосовуються в принциповій електричній схемі неавтономного генератора хаотичних сигналів представленій на рис. 1, виконують функцію нелінійного елемента, а резистори  $R_1$  та  $R_2$  є резисторами керування.

Елементи схеми мають наступні номінальні значень:

$$U_{\sim} = 9V, R_1 = 20 \text{ k}\Omega, R_2 = 200 \text{ k}\Omega, R_3 = 215 \text{ k}\Omega, R_4 = 21 \text{ k}\Omega, R_5 = 25 \Omega, \\ R_6 = 2.2 \text{ k}\Omega, R_7 = 4.5 \text{ k}\Omega, R_8 = 3.2 \text{ k}\Omega, C_1 = 200 \text{ nF}, C_2 = 20 \text{ nF}, L_1 = 48 \text{ mH}.$$

Живлення операційних підсилювачів є біполярним і дорівнює  $\pm 18V$ .

Паралельно з'єднані індуктивність  $L_1$  та ємність  $C_1$  формують коливний контур. Зв'язок між коливальним контуром та нелінійним активним елементом забезпечується резистором  $R_6$  та ємністю  $C_2$ .

В результаті моделювання роботи неавтономного генератора в програмному середовищі Multisim, були отримані фазовий портрет (рис. 5) та часові залежності сигналів на ємностях  $C1$  та  $C2$  (рис. 6).

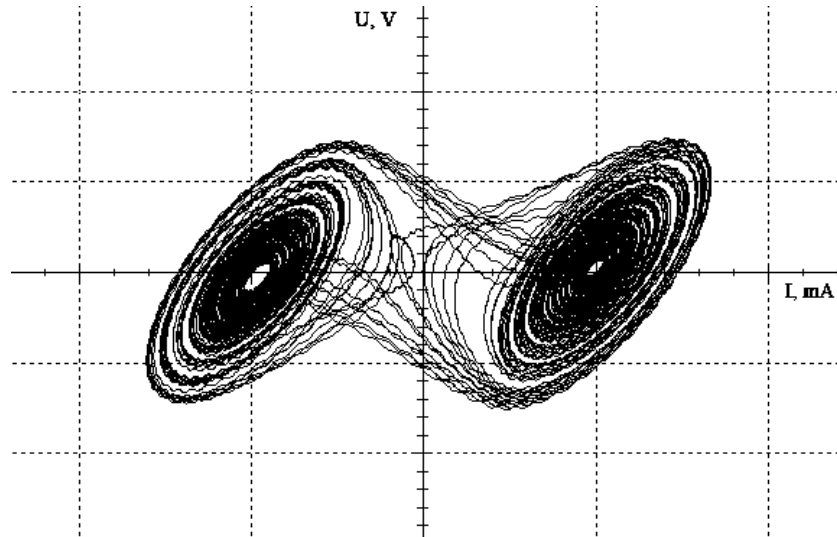


Рис. 5. Фазовий портрет неавтономного генератора

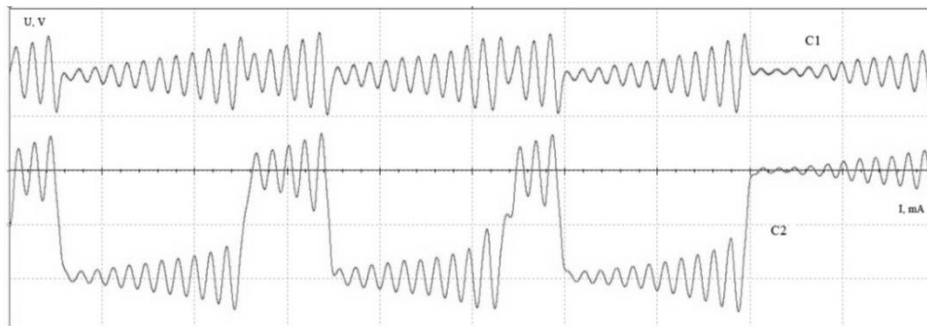


Рис. 6. Часові залежності сигналів на конденсаторах  $C1$  та  $C2$

За результатами моделювання був виготовлений експериментальний зразок неавтономного генератора хаотичних сигналів (рис. 7).

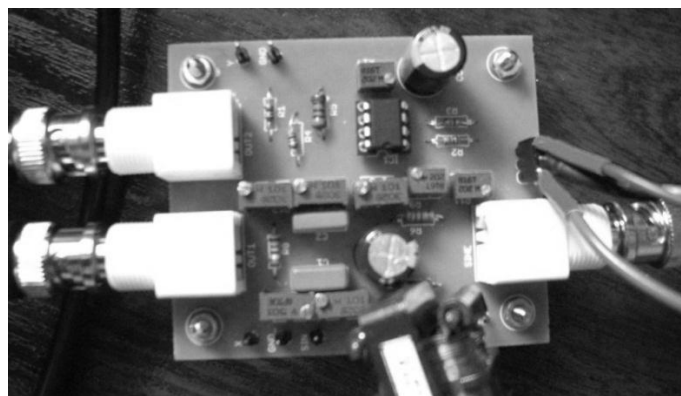


Рис. 7. Експериментальний зразок неавтономного генератора за схемою Чуа

Результат даного експериментального генератора приведені на рис. 8 та рис. 9.

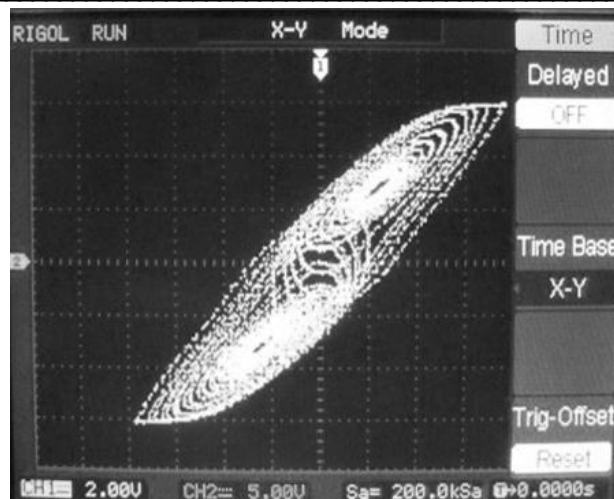


Рис. 8. Хаотичний атрактор неавтономного генератора

Часові залежності сигналів даного неавтономного генератора хаотичних сигналів на основі схеми Чуа показані на рис. 9.

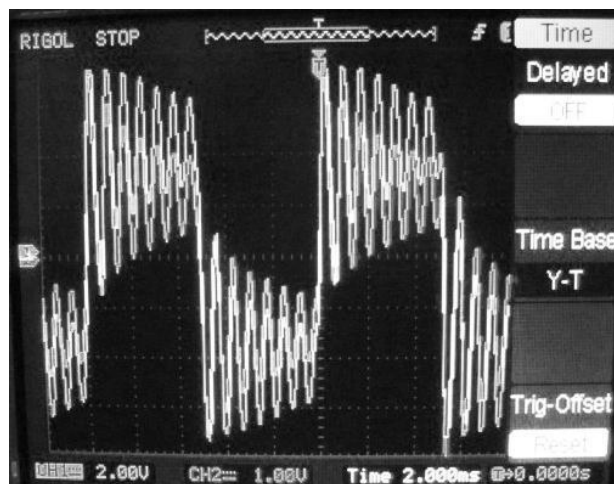


Рис. 9. Часові залежності експериментального зразка неавтономного генератора

Спектральний розподіл сигналу на рівні 5 кГц приведений на рис. 10.



Рис. 10. Спектральна характеристика неавтономного генератора, реалізованого за схемою Чуа

Як видно з рисунків наведених вище, що результати комплексного моделювання в Multisim та Wolfram Mathematica співпадають з практичною реалізацією експериментального зразка неавтономного генератора хаотичних сигналів на основі схеми Чуа, що свідчить про підтвердження експериментальними результатами теоретичних співвідношень математичних моделей.

### Висновки

Запропоновано та представлено модифіковану схему неавтономного хаотичного генератора, що базується на схемі Чуа з використанням двох операційних підсилювачів типу AD712. Модифікація полягала у підключення генератора синусоїдального сигналу, що служить для генерування несучої складової, та підборі відповідних параметрів схеми, які реалізують хаотичний режим.

Експериментально був зібраний зразок неавтономного генератора за схемою Чуа та проведено дослідження його властивостей. Даний неавтономний генератор в порівнянні з існуючими, придатний до взаємодії з цифровими приладами.

### Список використаної літератури

1. Khrapko S. M. Impulsive synchronization of the ring chaotic generators with 1,5 degrees of freedom / S. M. Khrapko, S. D. Galiuk, L. F. Politanskii. // Eastern European Scientific Journal. – 2014. – №6. – P. 353–357.
2. Eliashiv O. M. Generator of hiperchaotic oscillations based on Chua's circuit / O. M. Eliashiv, S. M. Khrapko, L. F. Politanskii. // Naukovyj Visnyk CHNU. – 2011. – №1. – P. 52–56.
3. Lakshmanan M. Experimental Chaos from Non-Autonomous Electronic Circuits / M. Lakshmanan, K. Murali. // JSTOR. – 1995. – №1701. – P. 33–46.
4. Murali K. The simplest dissipative nonautonomous chaotic circuit / K. Murali, M. Lakshmanan, L. Chua. // IEEE Trans. Circuits Systems. – 1994. – №41. – P. 462–463.
5. Kennedy M. Van der Pol and chaos / M. Kennedy, L. Chua. // IEEE Trans. Circuits Systems. – 1983. – №33. – P. 974–980.
6. Lacy J. G. A simple piecewise-linear nonautonomous circuit with chaotic behavior / J. G. Lacy. // Bifurcation and Chaos. – 1996. – №6. – P. 2097–2100.
7. Kennedy M. P. Robust op-amp realization of Chua's circuit / M. P. Kennedy. // Frequenz. – 1992. – №46. – P. 66–80.
8. Murali K. Bifurcation and chaos of the sinusoidally driven Chua's circuit / K. Murali, M. Lakshmanan. // Int. J. Bifurc. Chaos. – 1991. – №1. – P. 369–384.
9. Murali K. The simplest dissipative nonautonomous chaotic circuit / K. Murali, M. Lakshmanan, L. Chua. // IEEE Trans. Circuits Syst.. – 1994. – №41. – P. 462–463.
10. Bolona E.I. Modeling of dynamic chaos in colpitts oscillator in the complex mathematica / E.I. Bolonna, G.M. Rozoryniv, P.M. Shpatar // Modern information security. – 2014. - №4. – P. 75-80.
11. Elwakil, A., & Kennedy, M. P. Construction of classes of circuit-independent chaotic oscillator using passive-only nonlinear devices. // IEEE Trans. Circuits Syst– 48. –2001. –P.289–307.
12. Elwakil A, Ozoguz S. Pulse-excited RC nonautonomous chaotic oscillator structures Circuits and Systems, –2004. ISCAS'04. –P.69–75.
13. Elwakil A. S. Nonautonomous pulse-driven chaotic oscillator based on Chua's circuit / A. S. Elwakil. // Microelectronics Journal. – 2002. – №33. – P. 479–486.
14. Özoguz S. On the Realization of Circuit-Independent Nonautonomous Pulse-Excited Chaotic Oscillator Circuits / S. Özoguz, A. S. Elwakil. // IEEE Xplore. – 2004. – №10. – P. 532–536.

15. Kiliç R. A new nonautonomous version of Chua's circuit: Experimental observations / R. Kiliç, Ö. Galip Saraçoğlu, F. Yildirim. // Journal of The Franklin Institute ELSEVIER. – 2005. – №343. – P. 191–203.
16. Generators of chaotic oscillations/ [B. I. Shakhtarin, P. I. Kobylkina, Y. A. Sidorkina, etc.]. – Moscow, 2007. – 248 p. – (Gelios).

*Автори статті*

**Храпко Святослав Миколайович** – аспірант кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки. Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. E-mail: s.khrapko@chnu.edu.ua.

**Шпатар Петро Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки. Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. E-mail: shpatar@ukr.net.

**Політанський Леонід Францович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки. Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. E-mail: rt-dpt@chnu.cv.ua.

*Authors of the article*

**Khrapko Sviatoslav Mykolajovych** – postgraduate student, department of the Radio Engineering and Information Security, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, E-mail: s.khrapko@chnu.edu.ua.

**Shpatar Petro Mihaylovich** - candidate of science (technic), assistant professor, associate professor department of the Radio Engineering and Information Security, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, E-mail: p.shpatar@chnu.edu.ua.

**Politansky Leonid Francovych** - sciences doctor (technic), professor, department of the Radio Engineering and Information Security, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, E-mail: rt-dpt@chnu.cv.ua.

Дата надходження в редакцію: 14.05.2017 р.

Рецензент: д.т.н., с.н.с. М.П. Трембовецький