

12. Yarmoliuk, O. S. (2012). Modelyuvannya parametriv dzherel rozpodilenoї heneratsiyi v intehrovanykh elektropostachal'nykh systemakh iz urakhuvannyam nevyznachenoї informatsiyi. Tekhnichna elektrodynamika. Kyiv: Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 3, 57–58.

13. Denysiuk, S., Prytyskach, I. (2014). Development of the On-line Power Transformer State Monitoring System.

International Journal of Computing and Technology, 1 (5), 191–195.

14. Geidl, M., Koppel, G., Favre-Perrod, P. et. al. (2007). The energy hub – a powerful concept for future energy systems. Third annual Carnegie mellon conference on the electricity industry, 10.

*Рекомендовано до публікації член-кор. НАН України, д-р техн. наук Басок Б. І.
Дата надходження рукопису 09.08.2016*

Веремійчук Юрій Андрійович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: abonne@i.ua

Притисках Іван Васильович, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: prytyskach.ivan@gmail.com

Ярмолук Олена Сергіївна, кандидат технічних наук, старший викладач, кафедра електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: yarmolyuk.lena@gmail.com

Опришко Віталій Павлович, аспірант, кафедра електропостачання, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: livstrongtm@gmail.com

УДК 004.942

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.76921

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

© А. В. Садовой, Р. С. Волянский, Н. В. Волянская

Выполнен анализ методов построения математических моделей цепи Чуа, и обоснованы преимущества метода контурных токов. Построена интервальная математическая модель цепи Чуа, и определены ее предельные аттракторы. Показано, что использование интервальных моделей позволяет одновременно исследовать все возможные траектории движения динамического объекта в наперед выбранном интервале. Приведены результаты математического моделирования

Ключевые слова: интервальная модель, хаотическая динамика, цепь Чуа, траектории движения, контурный ток

The analysis of development methods of Chua's circuit mathematical models is done and benefits of loop currents method are substantiated. The interval mathematical model of Chua's circuit is built and its limiting attractors are defined. It is shown that the interval models usage can simultaneously examine whole possible dynamic object's paths in a previously chosen range. The results of mathematical modeling are given

Keywords: interval model, chaotic dynamics, Chua's circuit, paths, loop current

1. Введение

Со времени открытия в конце 19 века явления динамического хаоса, математическое описание систем с хаотической динамикой прошло длинный путь от чисто математических абстракций до моделей реальных физических, экономических, метеорологических и других систем. Поэтому в настоящее время хаотические системы находят все

большее применение в различных отраслях науки и техники [1].

Одной из простейших систем с хаотической динамикой является нелинейная электрическая цепь, предложенная Л. Чуа (рис. 1) [2] как упрощение известной динамической системы Э. Лоренца [3]. Область использования цепи Чуа предусматривает возможность создания защищенных каналов связи и

построения планировщика хаотических траекторий для автономных транспортных средств, осуществляющих ландшафтную съемку или патрулирование заданной области.

2. Литературный обзор

Несмотря на то, что известен ряд работ [4–6], посвященных реализации цепи Чуа на базе аналоговой схемотехники, в настоящее время для исследования работы цепи Чуа широко используется математическое моделирование [7–9].

Недостатком существующего подхода к построению моделей цепи Чуа является использование законов Кирхгофа. В то же время, составление описания движения цепи Чуа при помощи законов Кирхгофа является достаточно трудоемким процессом [10], с которым приходится сталкиваться исследователю при попытке учета рассеяния энергии в реактивных элементах. Кроме того, существующие математические модели цепи Чуа построены на основании дифференциальных уравнений с точно определенными параметрами. Для построения области возможных траекторий движения электротехнической системы такие модели необходимо использовать многократно с различными наборами параметров и/или начальными условиями. Очевидно, что такой процесс является трудоемким и отличается высокими затратами вычислительных ресурсов.

Устранить указанные сложности можно путем использования метода контурных токов [10]. Этот метод является высокоформализуемым как в смысле составления уравнений движения, так и их решения. Поэтому он может быть взят за основу для построения математической модели динамической системы, которая учитывает изменение ее параметров. Этот учет удобно осуществлять путем перехода к дифференциальным уравнениям в интервальной форме [11].

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является демонстрация применения методов интервальной математики для исследования электротехнических систем с хаотической динамикой.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- на основании метода контурных токов составлена математическая модель цепи Чуа, которая в отличие от существующих моделей может быть использована для исследования динамики цепи Чуа в любых фазовых координатах и для определения любых основных и производных координат электрической цепи;

- путем использования методов интервальной математики осуществлено преобразование полученной ранее модели в интервальную форму. В отличие от точных математических моделей интервальные модели описывают любые движения электротехнической системы в заданных интервалах и позволяют одновременно исследовать не одну траекторию движения, а рассматривать их бесконечное множество внутри заданного интервала;

- определены предельные аттракторы динамической системы, и выполнено математическое моделирование цепи Чуа на границах интервалов и при номинальных параметрах.

4. Динамическая модель цепи Чуа в контурных токах

Математическую модель цепи Чуа будем составлять на основании приведенной на рис. 1 принципиальной схемы управляемой цепи Чуа.

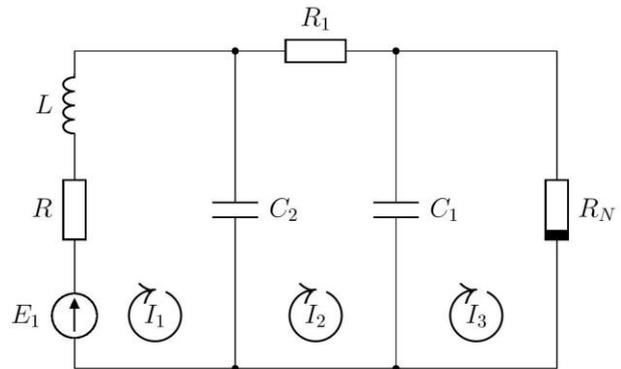


Рис. 1. Принципиальная схема управляемой цепи Чуа

Условно разбив схему на ряд независимых контуров и, приняв, что в каждом из контуров схемы протекает соответствующий контурный ток $I_1 - I_3$, запишем уравнения электрического равновесия.

$$\begin{aligned}
 RI_1 + L \frac{dI_1}{dt} + U_{c2}(I_1) - U_{c2}(I_2) &= E_1; \\
 -U_{c2}(I_1) + U_{c2}(I_2) + R_1 I_2 + U_{c1}(I_2) - U_{c1}(I_3) &= 0; \\
 -U_{c1}(I_2) + U_{c1}(I_3) + R_N I_3 &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где R_N – сопротивление нелинейного элемента, $U_{ci}(I_j)$ – падение напряжения на i -м конденсаторе, вызванное j -м контурным током.

Приняв во внимание, что напряжение на i -м конденсаторе связано с j -м контурным током интегральной зависимостью

$$U_{ci}(I_j) = \frac{1}{C_i} \int I_j dt,
 \tag{2}$$

представим уравнения (1) следующим образом

$$\begin{aligned}
 RI_1 + L \frac{dI_1}{dt} + \frac{1}{C_2} \int I_1 dt - \frac{1}{C_2} \int I_2 dt &= E_1; \\
 -U_{c1}(I_2) + U_{c1}(I_3) + R_N I_3 &= 0, \\
 -\frac{1}{C_1} \int I_2 dt + \frac{1}{C_1} \int I_3 dt + R_N I_3 &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

или после приведения подобных слагаемых

$$RI_1 + L \frac{dI_1}{dt} + \frac{1}{C_2} \int (I_1 - I_2) dt = E_1;$$

$$\frac{1}{C_2} \int (I_2 - I_1) dt + R_1 I_2 + \frac{1}{C_1} \int (I_2 - I_3) dt = 0;$$

$$\frac{1}{C_1} \int (I_3 - I_2) dt + R_N I_3 = 0. \quad (4)$$

Для удобства дальнейших преобразований запишем уравнения (4) в операторной форме

$$R I_1 + L p I_1 + \frac{1}{p C_2} (I_1 - I_2) = E_1;$$

$$\frac{1}{p C_2} (I_2 - I_1) + R_1 I_2 + \frac{1}{p C_1} (I_2 - I_3) = 0;$$

$$\frac{1}{p C_1} (I_3 - I_2) + R_N I_3 = 0, \quad (5)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования.

Считая, что вольт-амперная характеристика диода Чуа аппроксимируется кубическим полиномом вида

$$U_{RN} = a I_{RN} + b I_{RN}^3, \quad (6)$$

где a, b – коэффициенты аппроксимации, определим нелинейное сопротивление следующим образом

$$R_N = \frac{U_{RN}}{I_{RN}} = a + b I_{RN}^2. \quad (7)$$

Подстановка нелинейного сопротивления (7) в систему уравнений (5) с учетом того, что

$$I_{RN} = I_3, \quad (8)$$

позволяет представить уравнения движения цепи Чуа следующим образом

$$R I_1 + L p I_1 + \frac{1}{p C_2} (I_1 - I_2) = E_1;$$

$$\frac{1}{p C_2} (I_2 - I_1) + R_1 I_2 + \frac{1}{p C_1} (I_2 - I_3) = 0;$$

$$\frac{1}{p C_1} (I_3 - I_2) + a I_3 + b I_3^3 = 0. \quad (9)$$

Система интегро-дифференциальных уравнений (9) описывает поведение цепи Чуа в контурных токах для случая стационарных параметров.

5. Интервальная динамическая модель цепи Чуа в контурных токах

В теории динамических систем с хаотической динамикой большой интерес вызывает исследование влияния параметров систем на их движение. Современные методы интервальной математики позволяют упростить такое исследование и создают предпосылки для его унификации.

При составлении интервальной модели будем считать, что параметры цепи Чуа и ЭДС источника могут изменяться в некоторых пределах или их зна-

чения известны с лишь некоторой точностью, заданной интервалами возможных значений. В этом случае уравнения (9) примут вид

$$R \mathbf{I}_1 + L p \mathbf{I}_1 + \frac{I_1 - I_2}{p C_2} = \mathbf{E}_1;$$

$$\frac{I_2 - I_1}{p C_2} + R_1 I_2 + \frac{I_2 - I_3}{p C_1} = 0;$$

$$\frac{I_3 - I_2}{p C_1} + a \mathbf{I}_3 + b \mathbf{I}_3^3 = 0. \quad (10)$$

Интервальные величины, входящие в систему (10), определены следующим образом

$$\mathbf{R} = [R_{\min}, R_{\max}], \mathbf{R}_1 = [R_{1\min}, R_{1\max}], \mathbf{L} = [L_{\min}, L_{\max}],$$

$$\mathbf{C}_1 = [C_{1\min}, C_{1\max}], \mathbf{C}_2 = [C_{2\min}, C_{2\max}],$$

$$\mathbf{E}_1 = [E_{1\min}, E_{1\max}],$$

$$\mathbf{I}_1 = [I_{1\min}, I_{1\max}], \mathbf{I}_2 = [I_{2\min}, I_{2\max}], \mathbf{I}_3 = [I_{3\min}, I_{3\max}],$$

$$\mathbf{a} = [a_{\min}, a_{\max}], \mathbf{b} = [b_{\min}, b_{\max}], \quad (11)$$

причем индексы min и max указывают минимальную и максимальную границу интервала соответствующего параметра или координаты.

Подставив значения интервалов (11) в систему (10), получим

$$[R_{\min}, R_{\max}][I_{1\min}, I_{1\max}] + [L_{\min}, L_{\max}] \times$$

$$\times p [I_{1\min}, I_{1\max}] + \frac{[I_{1\min}, I_{1\max}] - [I_{2\min}, I_{2\max}]}{p [C_{2\min}, C_{2\max}]} =$$

$$= [E_{1\min}, E_{1\max}];$$

$$\frac{[I_{2\min}, I_{2\max}] - [I_{1\min}, I_{1\max}]}{p [C_{2\min}, C_{2\max}]} + [R_{1\min}, R_{1\max}] \times$$

$$\times [I_{2\min}, I_{2\max}] + \frac{[I_{2\min}, I_{2\max}] - [I_{3\min}, I_{3\max}]}{p [C_{1\min}, C_{1\max}]} = 0;$$

$$\frac{[I_{3\min}, I_{3\max}] - [I_{2\min}, I_{2\max}]}{p [C_{1\min}, C_{1\max}]} + [a_{\min}, a_{\max}] \times$$

$$\times [I_{3\min}, I_{3\max}] + [b_{\min}, b_{\max}] [I_{3\min}, I_{3\max}]^3 = 0. \quad (12)$$

Уравнения (12) являются интервальными интегро-дифференциальными уравнениями и в соответствии с правилами интервальной арифметики могут быть представлены следующим образом

$$\left[\min(\mathbf{R} \mathbf{I}_1) + \min(L p I_1) + \min\left(\frac{I_1 - I_2}{p C_2}\right), \right.$$

$$\left. \max(\mathbf{R} \mathbf{I}_1) + \max(L p I_1) + \max\left(\frac{I_1 - I_2}{p C_2}\right) \right] =$$

$$= [E_{1\min}, E_{1\max}];$$

$$\left[\min\left(\frac{I_2 - I_1}{pC_2}\right) + \min(R_1 I_2) + \min\left(\frac{I_2 - I_3}{pC_1}\right), \right. \\ \left. \max\left(\frac{I_2 - I_1}{pC_2}\right) + \max(R_1 I_2) + \right. \\ \left. + \max\left(\frac{I_2 - I_3}{pC_1}\right) \right] = 0; \\ \left[\min\left(\frac{I_3 - I_2}{pC_1}\right) + \min(\mathbf{aI}_3) + \min(\mathbf{bI}_3^3), \right. \\ \left. \max\left(\frac{I_3 - I_2}{pC_1}\right) + \max(\mathbf{aI}_3) + \max(\mathbf{bI}_3^3) \right] = 0. \quad (13)$$

Составляющие, которые образуют интервалы уравнений (13), определяются выражениями

$$\min(\mathbf{RI}_1) = \\ = \min(R_{\min} I_{1\min}, R_{\max} I_{1\min}, R_{\min} I_{1\max}, R_{\max} I_{1\max}); \\ \max(\mathbf{RI}_1) = \\ = \max(R_{\min} I_{1\min}, R_{\max} I_{1\min}, R_{\min} I_{1\max}, R_{\max} I_{1\max}); \\ \min(LpI_1) = \\ = \min(L_{\min} pI_{1\min}, L_{\max} pI_{1\min}, L_{\min} pI_{1\max}, L_{\max} pI_{1\max}); \\ \max(LpI_1) = \\ = \max(L_{\min} pI_{1\min}, L_{\max} pI_{1\min}, L_{\min} pI_{1\max}, L_{\max} pI_{1\max}); \\ \min(R_1 I_2) = \\ = \min(R_{1\min} I_{2\min}, R_{1\max} I_{2\min}, R_{1\min} I_{2\max}, R_{1\max} I_{2\max}); \\ \min(R_1 I_2) = \\ = \min(R_{1\min} I_{2\min}, R_{1\max} I_{2\min}, R_{1\min} I_{2\max}, R_{1\max} I_{2\max}); \\ \min(\mathbf{aI}_3) = \\ = \min(a_{\min} I_{3\min}, a_{\max} I_{3\min}, a_{\min} I_{3\max}, a_{\max} I_{3\max}); \\ \max(\mathbf{aI}_3) = \\ = \max(a_{\min} I_{3\min}, a_{\max} I_{3\min}, a_{\min} I_{3\max}, a_{\max} I_{3\max}); \\ \min(R_1 I_2) = \\ = \max(R_{1\min} I_{2\min}, R_{1\max} I_{2\min}, R_{1\min} I_{2\max}, R_{1\max} I_{2\max});$$

$$\min\left(\frac{I_1 - I_2}{pC_2}\right) = \frac{I_{1\min} - I_{2\min}}{pC_{2\max}};$$

$$\max\left(\frac{I_1 - I_2}{pC_2}\right) = \frac{I_{1\max} - I_{2\max}}{pC_{2\min}};$$

$$\min(I_3^3) = \\ = \min(I_{3\min}^3, I_{3\min}^2 I_{3\max}, I_{3\min} I_{3\max}^2, I_{3\max}^3);$$

$$\max(I_3^3) = \\ = \max(I_{3\min}^3, I_{3\min}^2 I_{3\max}, I_{3\min} I_{3\max}^2, I_{3\max}^3);$$

$$\min(\mathbf{bI}_3^3) = \min(b_{\min} \min(I_3^3), b_{\max} \min(I_3^3),$$

$$b_{\min} \max(I_3^3), b_{\max} \max(I_3^3));$$

$$\max(\mathbf{bI}_3^3) = \max(b_{\min} \min(I_3^3), b_{\max} \min(I_3^3),$$

$$b_{\min} \max(I_3^3), b_{\max} \max(I_3^3)). \quad (14)$$

Уравнения (12) описывают движение любой цепи Чуа, параметры и координаты которой находятся в интервалах (11). Выделив из системы (13) уравнения, которые описывают движение цепи Чуа на границах интервалов (10), получим уравнение движения цепи Чуа вдоль нижней

$$\min(\mathbf{RI}_1) + \min(LpI_1) + \min\left(\frac{I_1 - I_2}{pC_2}\right) = E_{1\min};$$

$$\min\left(\frac{I_2 - I_1}{pC_2}\right) + \min(R_1 I_2) + \min\left(\frac{I_2 - I_3}{pC_1}\right) = 0;$$

$$\min\left(\frac{I_3 - I_2}{pC_1}\right) + \min(\mathbf{aI}_3) + \min(\mathbf{bI}_3^3) = 0 \quad (15)$$

и верхней

$$\max(\mathbf{RI}_1) + \max(LpI_1) + \max\left(\frac{I_1 - I_2}{pC_2}\right) = E_{1\max};$$

$$\max\left(\frac{I_2 - I_1}{pC_2}\right) + \max(R_1 I_2) + \max\left(\frac{I_2 - I_3}{pC_1}\right) = 0;$$

$$\max\left(\frac{I_3 - I_2}{pC_1}\right) + \max(\mathbf{aI}_3) + \max(\mathbf{bI}_3^3) = 0 \quad (16)$$

границ соответствующих интервалов. Эти уравнения определяют предельные аттракторы динамической системы при изменении ее параметров.

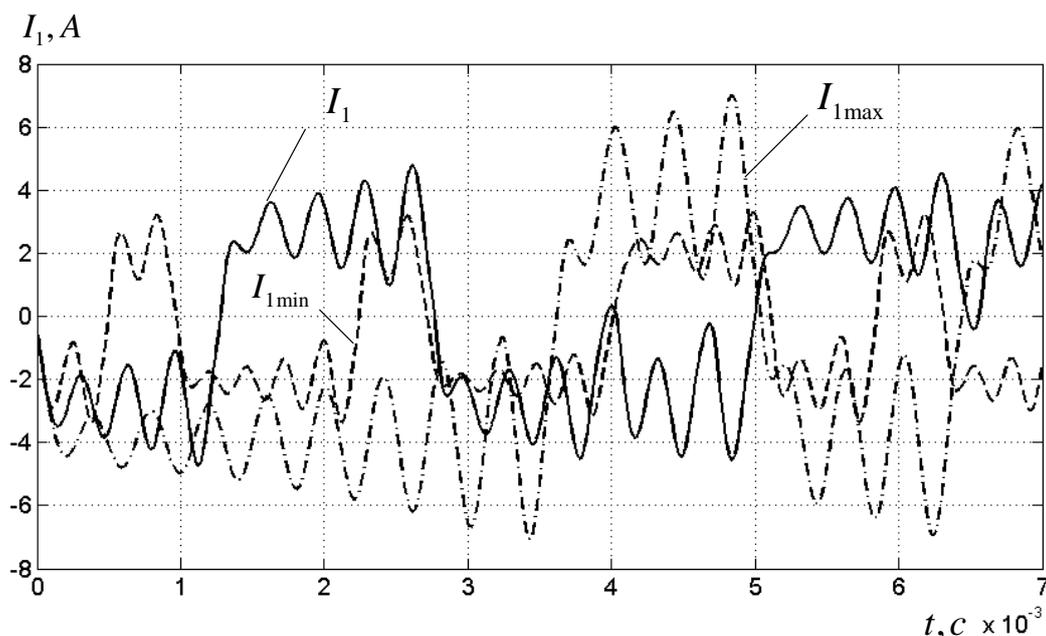
6. Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 показаны графики изменения контурного тока I_1 при номинальных параметрах цепи и при граничных значениях параметров, заданных интервалом. В качестве номинальных приняты следующие параметры цепи Чуа $C_1 = 10 \cdot 10^{-9}$ Ф, $C_2 = 100 \cdot 10^{-9}$ Ф, $R_1 = 1800$ Ом, $R = 1$ Ом и коэффициенты аппроксимации $a = 1$, $b = -0.143$.

Интервалы изменения параметров

$$C_1 = [9 \cdot 10^{-9}, 11 \cdot 10^{-9}], C_2 = [60 \cdot 10^{-9}, 160 \cdot 10^{-9}],$$

$$R_1 = [1650, 1950].$$

Рис. 2. Графики изменения контурного тока I_1 .

Анализ приведенных результатов позволяет оценить характер переходных процессов в рассматриваемой цепи и сформулировать следующее утверждение: если на границах интервала переходные процессы являются хаотическими, то хаотическая динамика будет у любой системы, параметры которой находятся в указанных интервалах.

Приведенные переходные процессы показывают, что на нижней границе интервала амплитуда контурного тока I_1 минимальна, а на верхней границе наоборот максимальна. Это создает предпосылки для формирования хаотических колебаний заданной амплитуды.

7. Выводы

Разработанная на основании метода контурных токов математическая модель цепи Чуа в отличие от существующих моделей может использоваться для исследования динамики цепи Чуа в любых фазовых координатах и определения любых основных и производных координат электрической цепи.

Составленная интервальная модель цепи Чуа в отличие от известных точных математических моделей описывает любые движения электротехнической системы в заданных интервалах и позволяет одновременно исследовать бесконечное множество траекторий движения хаотического электротехнического объекта внутри заданного интервала.

Найденные предельные аттракторы могут использоваться для выяснения условий возникновения хаотических колебаний в электрической цепи и определения границ фазового пространства, в котором существует фазовая траектория исследуемой системы. На основании этих аттракторов могут быть определены параметры или управляющее воздействие, подаваемое на систему, при которых коорди-

наты электротехнического объекта гарантировано попадают в заданную область фазового пространства.

Литература

1. Tel, T. Chaotic Dynamics: An introduction based on classical mechanics [Text] / T. Tel, M. Cruz. – New York: Cambridge University Press, 2006. – 427 p. doi: 10.1017/cbo9780511803277
2. Fortuna, L. Chua's circuit implementations: Yesterday, Today and Tomorrow [Text] / L. Fortuna, M. Frasca, M. G. Xibilia // World Scientific Series on Nonlinear Science Series A. – Singapore: World Scientific, 2009. – 224 p. doi: 10.1142/9789812839251
3. Hilborn, R. C. Chaos and nonlinear dynamics: An introduction for scientists and engineers [Text] / R. C. Hilborn. – New York: Oxford University Press, 2004. – 592 p.
4. Radwan, A. G. An inductorless CMOS realization of Chua's circuit [Text] / A. G. Radwan, A. M. Soliman, A.-L. El-Sedek // Chaos, Solitons & Fractals. – 2003. – Vol. 18, Issue 1. – P. 149–158. doi: 10.1016/s0960-0779(02)00582-9
5. Moqadasi, H. A new Chua's circuit with monolithic Chua's diode and its use for efficient true random generation in CMOS 180 nm [Text] / H. Moqadasi, M. B. Ghaznavi-Ghouschi // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2015. – Vol. 82, Issue 3. – P. 719–731. doi: 10.1007/s10470-015-0498-y
6. Yu, F. Research progress of multi-scroll chaotic oscillators based on current-mode devices [Text] / F. Yu, P. Li, K. Gu, B. Yin // Optik – International Journal for Light and Electron Optic. – 2016. – Vol. 127, Issue 13. – P. 5486–5490. doi: 10.1016/j.ijleo.2016.03.048
7. Kennedy, M. P. Three steps to chaos. II. A Chua's circuit primer [Text] / M. P. Kennedy // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. – 1993. – Vol. 40, Issue 10. – P. 657–674. doi: 10.1109/81.246141
8. Matsumoto, T. A chaotic attractor from Chua's circuit [Text] / T. Matsumoto // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 1984. – Vol. 31, Issue 12. – P. 1055–1058. doi: 10.1109/tcs.1984.1085459

9. Zhong, G.-Q. Implementation of Chua's circuit with a cubic nonlinearity [Text] / G.-Q. Zhong // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. – 1994. – Vol. 41, Issue 12. – P. 934–941. doi: 10.1109/81.340866

10. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: «Высшая школа», 1996. – 638 с.

11. Jaulin, L. Applied interval analysis [Text] / L. Jaulin, M. Kieffer, O. Didrit, E. Walter. – London: Springer, 2001. – 379 p. doi: 10.1007/978-1-4471-0249-6

References

1. Tel, T., Cruz, M. (2006). Chaotic Dynamics: An introduction based on classical mechanics. New York: Cambridge University Press, 427. doi: 10.1017/cbo9780511803277

2. Fortuna, L., Frasca, M., Xibilia, M. G. (2009). Chua's circuit implementations: Yesterday, Today and Tomorrow. World Scientific Series on Nonlinear Science Series A. – Singapore: World Scientific, 224. doi: 10.1142/9789812839251

3. Hilborn, R. C. (2004). Chaos and nonlinear dynamics: An introduction for scientists and engineers. New York: Oxford University Press, 592.

4. Radwan, A. G., Soliman, A. M., El-Sedeek, A.-L. (2003). An inductorless CMOS realization of Chua's circuit. Chaos, Solitons & Fractals, 18 (1), 149–158. doi: 10.1016/s0960-0779(02)00582-9

5. Moqadasi, H., Ghaznavi-Ghouschi, M. B. (2015). A new Chua's circuit with monolithic Chua's diode and its use for efficient true random number generation in CMOS 180 nm. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 82 (3), 719–731. doi: 10.1007/s10470-015-0498-y

6. Yu, F., Li, P., Gu, K., Yin, B. (2016). Research progress of multi-scroll chaotic oscillators based on current-mode devices. Optik – International Journal for Light and Electron Optics, 127 (13), 5486–5490. doi: 10.1016/j.ijleo.2016.03.048

7. Kennedy, M. P. (1993). Three steps to chaos. II. A Chua's circuit primer. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 40 (10), 657–674. doi: 10.1109/81.246141

8. Matsumoto, T. (1984). A chaotic attractor from Chua's circuit. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 31 (12), 1055–1058. doi: 10.1109/tcs.1984.1085459

9. Zhong, G.-Q. (1994). Implementation of Chua's circuit with a cubic nonlinearity. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 41 (12), 934–941. doi: 10.1109/81.340866

10. Bessonov, L. A. (1996). Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie cepi. Moscow: Vyshaya shkola, 638.

11. Jaulin, L., Kieffer, M., Didrit, O., Walter, E. (2001). Applied interval analysis. London: Springer, 379. doi: 10.1007/978-1-4471-0249-6

Дата надходження рукопису 29.07.2016

Садовой Александр Валентинович, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, Днепродзержинский государственный технический университет, ул. Днепростроевская, 2, г. Каменское, Украина, 51918
E-mail: sadovoy@dstu.dp.ua

Волянський Роман Сергєєвич, кандидат технических наук, доцент, кафедра электротехники и электромеханики, Днепродзержинский государственный технический университет, ул. Днепростроевская, 2, г. Каменское, Украина, 51918
E-mail: voliansky@ua.fm

Волянська Нина Вікторівна, старший преподаватель, кафедра теплоэнергетики, Днепродзержинский государственный технический университет, ул. Днепростроевская, 2, г. Каменское, Украина, 51918
E-mail: ninanin@i.ua