

## МОДЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ГЕНЕРАТОРІ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ ЗА СХЕМОЮ КОЛПІТЦЯ З ДВОТРАНЗИСТОРНИМ АКТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

У роботі розглянуто схемотехнічний варіант генератора детермінованого хаосу за схемою Колпिटця. Базова схема Колпिटця є класичним випадком триточкової схеми генератора. Динамічні процеси в такому генераторі описуються системою нелінійних диференціальних рівнянь третього порядку. Перевагами генераторів детермінованого хаосу за схемою Колпिटця є простота побудови та широкий діапазон робочих частот (від одиниць кілогерц до десяти гігагерц). Основними недоліками генераторів детермінованого хаосу за схемою Колпिटця є обмежений динамічний діапазон генерованих хаотичних коливань та висока чутливість генератора до дестабілізуючих факторів. Для усунення цих недоліків застосовують такі схемні рішення активних елементів транзисторних генераторів: 1) схеми на складених транзисторах; 2) схеми з динамічним навантаженням; 3) каскодні схеми; 4) схеми на основі диференціального каскаду. У роботі обґрунтовано застосування схемотехнічного варіанту генератора Колпिटця на основі двокаскадного активного елементу. Наведена математична модель цього генератора. Математична модель складається з системи нелінійних рівнянь рівноваги автоколивальної системи 4-го порядку з урахуванням кусково-лінійних функцій апроксимації ВАХ переходів база-емітер біполярних транзисторів. Отримано результати математичного моделювання системи диференціальних рівнянь у нормованих змінних. У роботі отримано такі практичні результати: 1) фазові портрети генератору в площинах нормованих динамічних змінних; 2) фазові портрети генератору в просторах нормованих динамічних змінних; 3) часові діаграми генерованих хаотичних коливань; 4) частотні характеристики генерованих хаотичних коливань. Введення другого каскаду до схеми активного елементу генератора Колпिटця підвищує порядок автоколивальної системи та значно збагачує її динаміку. Для підвищення стійкості параметрів генерованих коливань до дестабілізуючих факторів, зокрема температури, застосовано симетричну схему живлення.

**Ключові слова:** детермінований хаос, генератор Колпिटця, електрична схема, математична модель, фазові портрети

A.O. SEMENOV

Vinnytsia National Technical University

## MODEL RESEARCH OF DYNAMIC PROCESSES IN THE DETERMINISTIC CHAOS OSCILLATOR BASED ON A COLPITTS CIRCUIT WITH A TWO-TRANSISTOR ACTIVE ELEMENT

The paper considers a scheme variant of a deterministic chaos oscillator on a Colpitts circuit. The basic Colpitts circuit is a classic case of a transistor oscillator. A system of non-linear differential 3-th order equations may describe dynamic processes in this oscillator. The advantages of the deterministic chaos oscillators on the Colpitts circuit is construction simplicity and a wide range of operating frequencies (from kHz to hundreds of GHz). The main drawbacks of the deterministic chaos oscillators on the Colpitts circuit is a restricted dynamic range of the generated oscillations and oscillator's high sensitivity to destabilizing factors. To eliminate these drawback such schematic decisions of transistor oscillators active elements are applied: 1) circuits on tandem transistors 2) circuits with dynamic load; 3) cascode circuits; 4) circuits based on a differential stage. The paper substantiates applying the scheme variant of the Colpitts oscillator on a two-stage active element. A mathematical model of this oscillator has been presented. The mathematical model consists of a balance differential equations system for the 4-th order self-oscillatory system allowing for I-V curves piecewise linear approximation functions of base-emitter bipolar transistor junctions. The results of mathematical modelling the differential equation system in normalized variables have been obtained. Such practical results have been obtained in the paper: 1) phase portraits of the oscillator in planes of normalized dynamic variables; 2) phase portraits of the oscillator in spaces of normalized dynamic variables; 3) time diagrams of the generated chaotic oscillations; 4) frequency characteristics of the generated chaotic oscillations. Implementing the second stage to the Colpitts oscillator's active element circuit increases the order of the self-oscillatory system and significantly widens its dynamics. A symmetrical feed circuit was applied to increase generated oscillation parameter tolerance to destabilizing factors especially to temperature.

**Keywords:** deterministic chaos, Colpitts oscillator, electric circuit, mathematical model, phase portraits

### Вступ

В останні роки широке поширення набули практичні застосування елементів математичної теорії фракталів та хаосу в багатьох напрямках науки і техніки [1, 2]. Існує велика кількість нелінійних динамічних систем і математичних моделей для їх опису [3, 4]. Найбільшого поширення вони отримали для створення генераторів електричних коливань детермінованого хаосу. Такі генератори застосовуються як функціональні вузли інформаційних і телекомунікаційних систем. Хаотичні коливання мають такі властивості [1-4]: 1) вони неперервні, неперіодичні та широкосмугові; 2) висока чутливість і складність динаміки коливань – один і той же генератор хаотичних сигналів може формувати зовсім різні сигнали при малій зміні початкових умов та/або параметрів коливальної системи; 3) слабка корельованість (автокореляційна функція хаотичних сигналів швидко затухає); 4) ортогональність; 5) висока інформаційна ємність.

Метою роботи є розв'язання динаміки електричних коливань детермінованого хаосу в генераторі, який побудований за схемою Колпिटця. Об'єктом дослідження є процеси генерування та формування сигналів детермінованого хаосу в генераторі детермінованого хаосу за схемою Колпिटця з двотранзисторним активним елементом. Предметом дослідження є фазові портрети, часові та частотні

параметри і характеристики сигналів генератора детермінованого хаосу за схемою Колпитця з двотранзисторним активним елементом.

### Електрична схема генератора детермінованого хаосу

На основі здійсненого автором огляду варіантів генераторів детермінованого хаосу за схемою Колпитця [5], у роботі було обґрунтовано та обрано схему генератору Колпитця з двотранзисторним активним елементом, яка наведена на рис. 1 [5, 6].

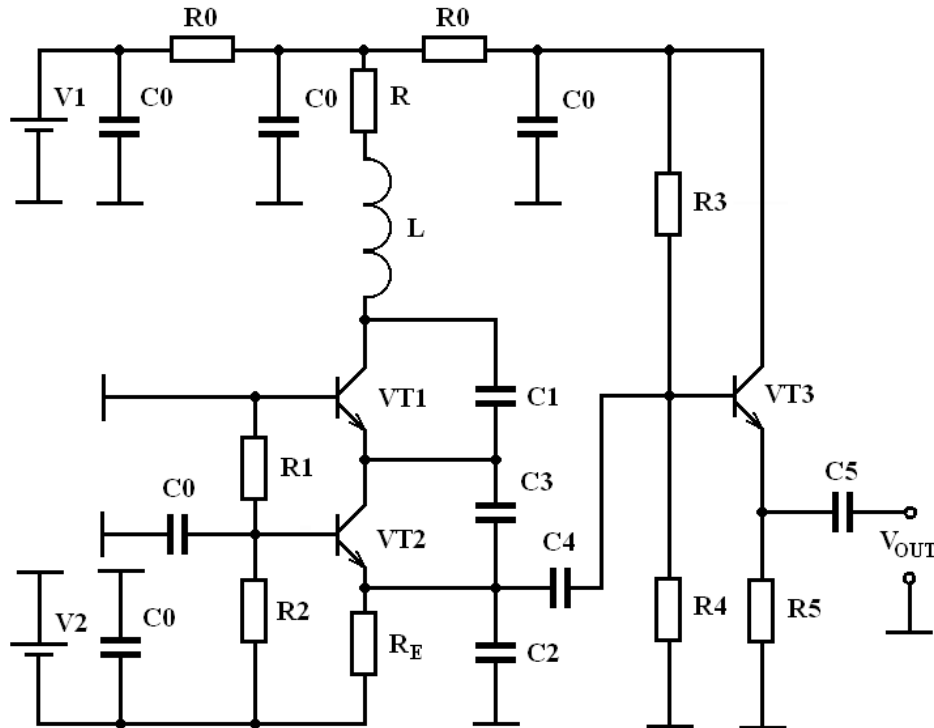


Рис. 1. Електрична схема генератора детермінованого хаосу з двотранзисторним активним елементом

Схема генератору детермінованого хаосу на рис. 1 складається з активного елементу на біполярному транзисторі VT1 і коливальної системи з котушки індуктивності L і конденсаторів C1-C2. Для розвинення динаміки генерованих хаотичних коливань в коло емітеру VT1 включений другий підсилювальний каскад на біполярному транзисторі VT2. Таким чином, двотранзисторний активний елемент генератору Колпитця на рис. 1 являє собою каскодну схему СЕ-СБ. До коливальної системи генератору додано конденсатор C3, який збільшує порядок автоколивальної системи з 3-го до 4-го. Для узгодження активного елементу генератору з навантаженням на виході використаний аперіодичний підсилювальний каскад на біполярному транзисторі VT3 по схемі СК. Конденсатори C0 і резистори R0 – це елементи блокувальних фільтрів по колу живлення, конденсатори C4-C5 застосовані як розділові, а резистори R-RE та R1-R2 забезпечують електричне зміщення відповідно транзисторів VT1 і VT2.

Основна частота генерації може бути визначена як [5, 6]

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3}{LC_1 C_2 C_3} - \frac{R^2}{L^2}}. \quad (1)$$

### Математична модель генератора

Динаміка генератору детермінованого хаосу Колпитця з двотранзисторним активним елементом описується системою звичайних диференціальних рівнянь, отриманих на основі скороченої системи рівнянь рівноваги за законами Кірхгофа [5, 6]

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_{C1}}{dt} = I_L - I_{EVT1}(r, V_{C2}, V_{C3}), \\ L \frac{dI_L}{dt} = V_0 - V_{C1} - V_{C2} - V_{C3} - RI_L, \\ C_3 \frac{dV_{C3}}{dt} = I_L - I_{EVT2}(r, V_{C2}), \\ C_2 \frac{dV_{C2}}{dt} = I_L - I_0. \end{cases} \quad (2)$$

При складанні системи (2) прийнято такі спрощення: 1) коефіцієнт підсилення  $\alpha = 1$ ; 2)

диференціальний опір переходу база-емітер  $R$  є постійною величиною (на практиці це можна забезпечити підбором струму зміщення  $I_0$ ). У безрозмірних змінних і нормованому часі система рівнянь (2) матиме вигляд [6]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 - F_1(a, x_3, x_4), \\ \dot{x}_2 = -x_1 - x_4 - x_3 - bx_2, \\ \varepsilon_3 \dot{x}_3 = x_2 - F_2(a, x_4), \\ \varepsilon_2 \dot{x}_4 = x_2 - 1, \end{cases} \quad (3)$$

де рівняння нормованих змінних і коефіцієнтів системи [6]

$$\begin{aligned} x_1 = \frac{V_{C1}}{\rho I_0}, x_2 = \frac{I_L}{I_0}, x_3 = \frac{V_{C3}}{\rho I_0}, x_4 = \frac{V_{C2}}{\rho I_0}, T = \frac{t}{\tau}, \\ a = \frac{\rho}{r}, b = \frac{R}{\rho}, \rho = \sqrt{\frac{L}{C_1}}, \tau = \sqrt{LC_1}, \varepsilon_2 = \frac{C_2}{C_1}, \varepsilon_3 = \frac{C_3}{C_1}, \end{aligned} \quad (4)$$

а кусково-лінійні функції апроксимації ВАХ переходів база-емітер [6]

$$F_1(a, x_3, x_4) = \begin{cases} 1 - a(x_4 + x_3), & a(x_4 + x_3) < 1, \\ 0, & a(x_4 + x_3) \geq 1, \end{cases} \quad (5)$$

$$F_2(a, x_4) = \begin{cases} 1 - ax_4, & ax_4 < 1, \\ 0, & ax_4 \geq 1. \end{cases} \quad (6)$$

Експериментальні дослідження, результати яких наведені в роботі [6] показали, що основна частота хаотичних коливань становить  $f = 0,3 \cdot f_T$ , де  $f_T$  – гранична частота біполярного транзистора VT1.

### Результати математичного моделювання

Подальші дослідження динамічних процесів у радіотехнічному генераторі детермінованого хаосу проведено автором на підставі математичної моделі (3) з урахуванням рівнянь (4)-(6). Дослідження проведено для режиму розвинутих хаотичних коливань з такими параметрами автоколивальної системи  $a=11.5$ ,  $b=0.6$ ,  $\varepsilon_2=4$ ,  $\varepsilon_3=4$  та для таких початкових умов (1, 0, 0, 1). Усі обчислення та графіки отримано автором за допомогою стандартної функції *rkfixed()* пакету програм MathCad 15.0.

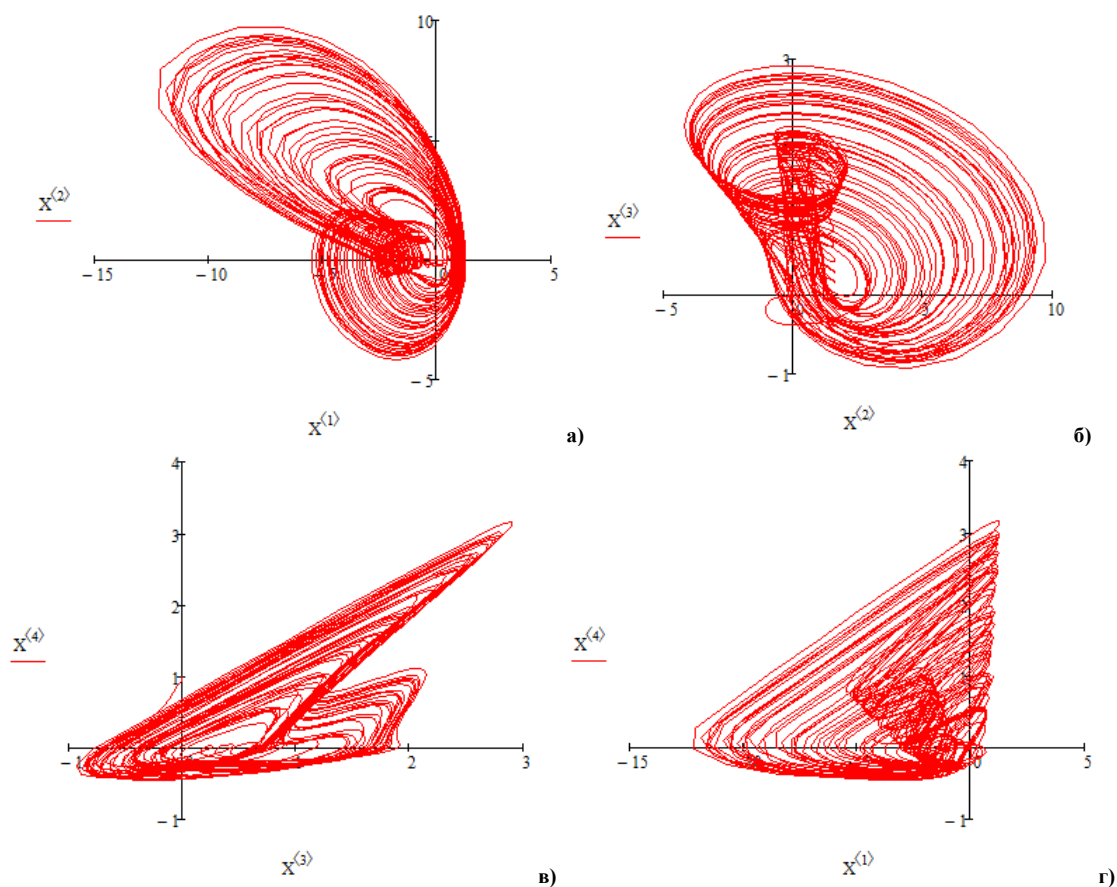


Рис. 2. Фазові портрети двокаскадного генератора детермінованого хаосу за схемою Колпитця в площинах нормованих змінних: а)  $x_1$ - $x_2$ , б)  $x_2$ - $x_3$ , в)  $x_3$ - $x_4$ , г)  $x_1$ - $x_4$

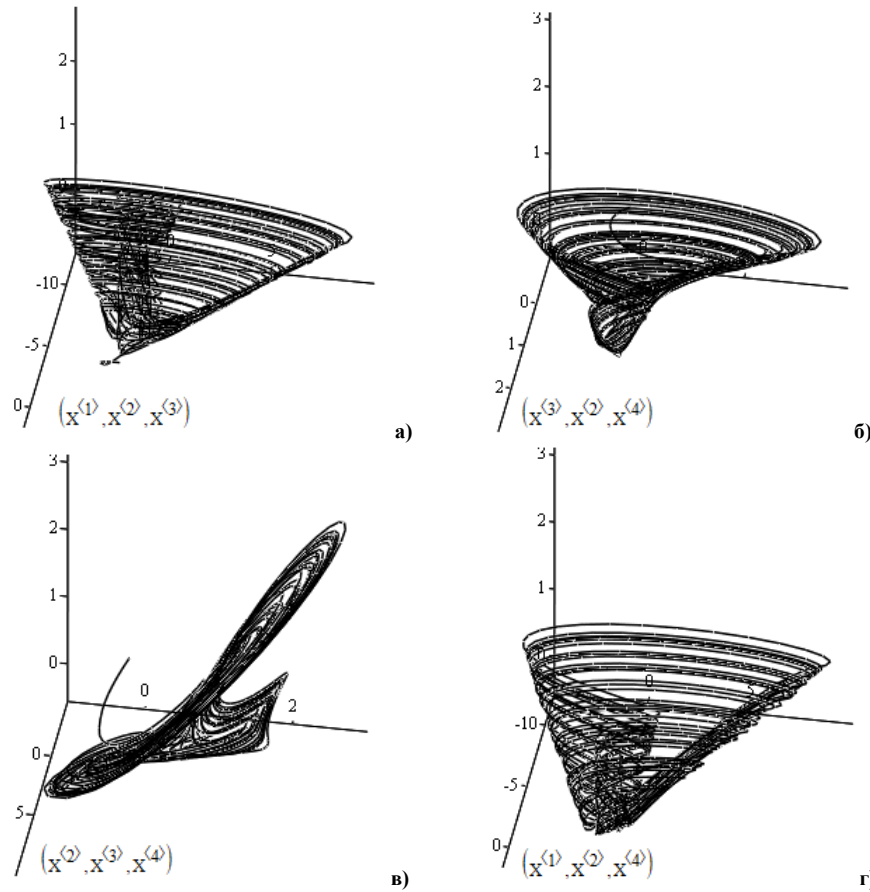


Рис. 3. Фазові портрети двокаскадного генератора детермінованого хаосу за схемою Колпितця у різних просторах нормованих змінних: а)  $x_1$ - $x_2$ - $x_3$ , б)  $x_3$ - $x_2$ - $x_4$ , в)  $x_2$ - $x_3$ - $x_4$ , г)  $x_1$ - $x_2$ - $x_4$

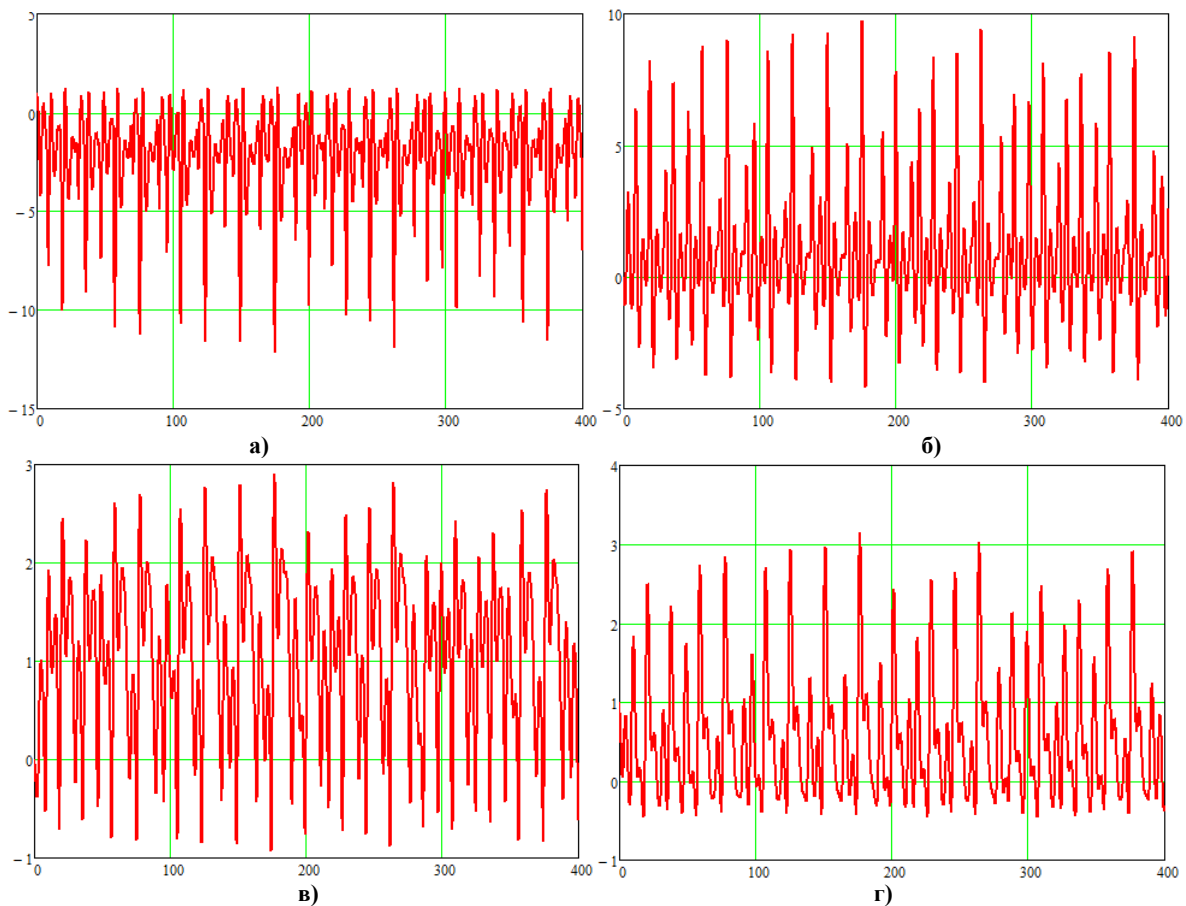
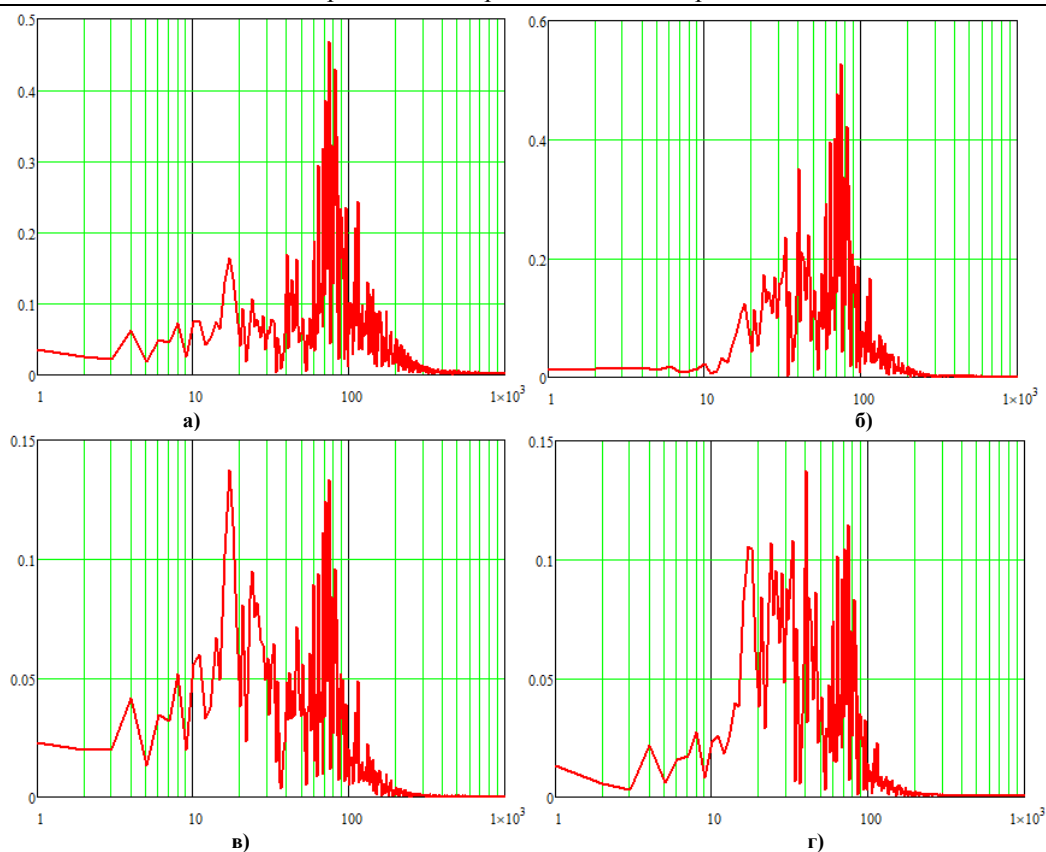
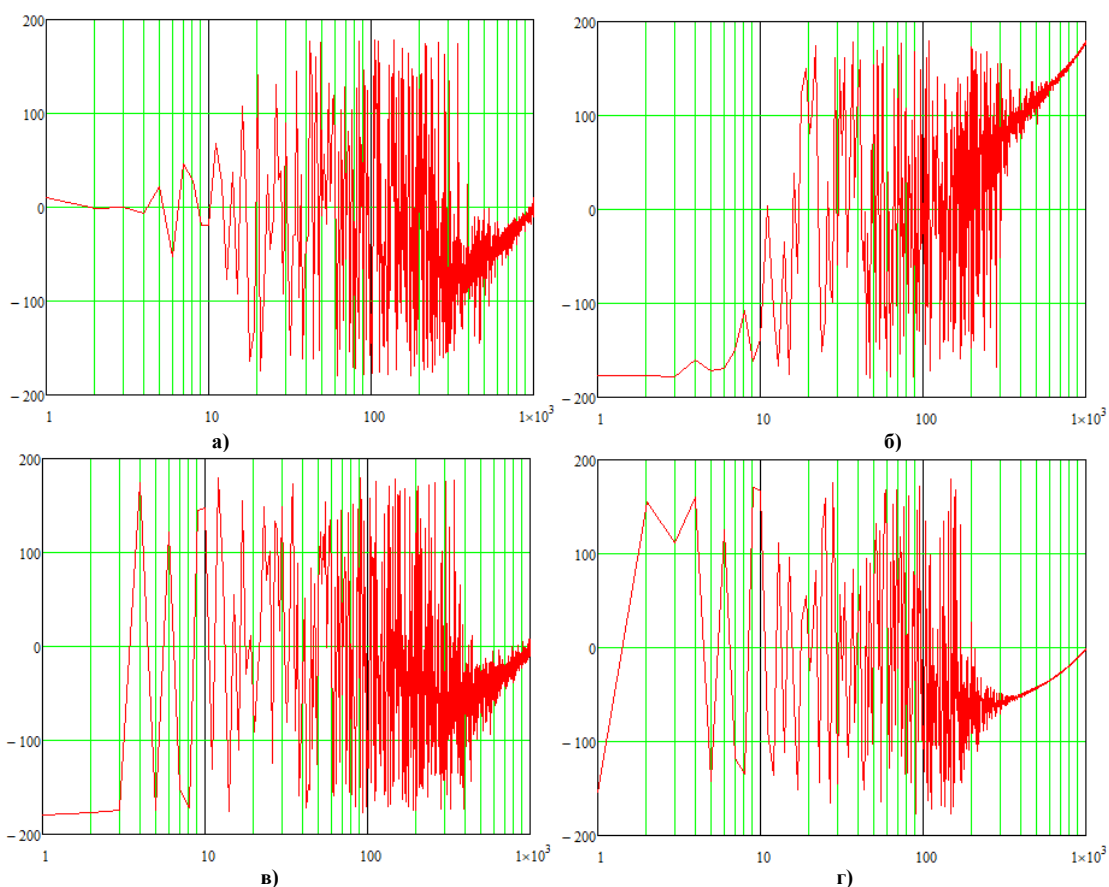


Рис. 4. Часові діаграми генерованих коливань нормованих змінних а)  $x_1$ , б)  $x_2$ , в)  $x_3$  та г)  $x_4$  в нормованому часі  $T = t/\sqrt{LC_1}$

Рис. 5. Амплітудо-частотні спектри генерованих коливань нормованих змінних а)  $x_1$ , б)  $x_2$ , в)  $x_3$  та г)  $x_4$ Рис. 6. Фазочастотні спектри генерованих коливань нормованих змінних а)  $x_1$ , б)  $x_2$ , в)  $x_3$  та г)  $x_4$ 

На рис. 2 наведено фазові портрети генератора детермінованого хаосу за схемою Колпитця з двотранзисторним активним елементом у різних площинах нормованих змінних. На рис. 3 наведено фазові портрети генератора детермінованого хаосу за схемою Колпитця з двотранзисторним активним елементом у різних просторах нормованих змінних. Зовнішній вигляд фазових портретів на рис. 1,а,б,г та рис. 3,а,в

схожий з відповідними фазовими портретами генератору Колпитця, але в той же час наявність третього рівняння системи (3) призводить до збільшення порядку автоколивальної системи та розвинення динаміки хаотичних коливань.

Часові діаграми хаотичних коливань нормованих змінних у нормованому часі  $T = t/\sqrt{LC_1}$  наведені на рис. 4. Амплітудо-частотний та фазочастотний спектри генерованих хаотичних коливань наведені на рис. 5 і рис. 6 відповідно (на вісях абсцис порядковий номер гармоніки по відношенню до  $f = 1/\sqrt{LC_1}$ ).

### Висновки

У роботі здійснено модельне дослідження генератору детермінованого хаосу за схемою Колпитця з двотранзисторним активним елементом. Як практичні результати отримано фазові портрети генератору, часові діаграми та частотні характеристики генерованих хаотичних коливань.

### Література

1. Генерация хаоса / Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И. [под общ. ред. Дмитриева А.С.]. – М.: Техносфера, 2012. – 424 с.
2. Шахтарин Б.И. Генераторы хаотических колебаний : учебн. пособие / [Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондратьев, С.В. Митин]. – М.: Гелиос АРВ, 2014. – 248 с.
3. Залогин Н. Н. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах / Н. Н. Залогин, В. В. Кислов. – М.: Радиотехника, 2006. – 205 с.
4. Vadim S. Anishchenko. Deterministic Nonlinear Systems. A Short Course / Vadim S. Anishchenko, Tatyana E. Vadivasova, Galina I. Strelkova. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
5. Семенов А. О. Транзисторні генератори детермінованого хаосу за схемою Колпитця / А. О. Семенов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2017. – №1. – с. 223-232.
6. G. Mykolaitis. Two-stage chaotic Colpitts oscillator for the UHF range / G. Mykolaitis, A. Tamaševičius, S. Bumelienė, A. Baziliauskas, E. Lindberg // Elektronika Ir Elektrotechnika. – 2004. – Nr. 4(53). – pp. 13-15.

### Reference

1. Generacija haosa / Dmitriev A.S., Efremova E.V., Maksimov N.A., Panas A.I. [pod obshh. red. Dmitrieva A.S.]. – M.: Tehnosfera, 2012. – 424 s.
2. Shahtarin B.I. Generatory haoticheskikh kolebanij : uchebn. posobie / [B.I. Shahtarin, P.I. Kobylkina, Ju.A. Sidorkina, A.V. Kondrat'ev, S.V. Mitin]. – M.: Gelios ARV, 2014. – 248 s.
3. Zalogin N. N. Shirokopolosnye haoticheskie signaly v radiotekhnicheskikh i informacionnykh sistemah / N. N. Zalogin, V. V. Kislov. – M.: Radiotekhnika, 2006. – 205 p.
4. Vadim S. Anishchenko. Deterministic Nonlinear Systems. A Short Course / Vadim S. Anishchenko, Tatyana E. Vadivasova, Galina I. Strelkova. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
5. Semenov A. O. Tranzystorni heneratory determinovanoho khaosu za skhemoiu Kopyttsia / A. O. Semenov // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2017. – #1. – s. 223-232.
6. G. Mykolaitis. Two-stage chaotic Colpitts oscillator for the UHF range / G. Mykolaitis, A. Tamaševičius, S. Bumelienė, A. Baziliauskas, E. Lindberg // Elektronika Ir Elektrotechnika. – 2004. – Nr. 4(53). – pp. 13-15.

Рецензія/Peer review : 23.5.2017 р.      Надрукована/Printed : 26.6.2017 р.  
Стаття рецензована редакційною колегією