

# ПРОСТИЙ БЕЗІНДУКТИВНИЙ RC-ГЕНЕРАТОР ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ДВОХ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет

## *Анотація*

*Розглянуто схему реалізації та математичну модель простого безіндуктивного RC-генератора детермінованого хаосу на двох біполярних транзисторах. За допомогою комп'ютерного схемотехнічного моделювання досліджено динамічні режими та фазові портрети простого безіндуктивного RC-генератора детермінованого хаосу на двох біполярних транзисторах.*

**Ключові слова:** детермінований хаос, RC-генератор, біполярний транзистор, математична модель, фазовий портрет, хаотичні коливання.

## *Abstract*

*The circuit implementation and the mathematical model of a simple non-inductive RC generator of deterministic chaos on two bipolar transistors are considered. Using computer circuit simulation, dynamic modes and phase portraits of a simple non-inductive RC generator of deterministic chaos on two bipolar transistors are investigated.*

**Keywords:** deterministic chaos, RC generator, bipolar transistor, mathematical model, phase portrait, chaotic oscillations.

## Вступ

У теперішній час в умовах швидкого розвитку інфокомунікаційних технологій і вдосконалювання технічних засобів обробки, передавання та зберігання інформації, зростає не лише кількість нових завдань у цій області, але й кількість технічних рішень уже відомих, традиційних завдань. Для цього ведеться пошук і створення нових технічних засобів [1-3]. Актуальним завданням є забезпечення конфіденційності при передачі інформації [4]. Один із напрямків рішення цього завдання пов'язане з використанням шумоподібних і хаотичних сигналів. Цей напрямок пов'язаний з використанням ширококутних хаотичних сигналів. Кількість робіт, присвячених застосуванню в системах зв'язку ширококутних хаотичних коливань, постійно зростає.

Основним важливим технічним засобом таких систем є генератор детермінованого хаосу [5, 6]. При виборі практичної реалізації генератора хаотичних коливань враховувався ряд обставин, а саме [7-9]: простота реалізації, наявність діапазону зміни параметрів, які забезпечують хаотичний режим, наявність математичної моделі, яка дозволяє достатньо просто моделювати хаотичний процес.

Таким чином, розробка фізичних моделей генераторів детермінованого хаосу й дослідження їхніх властивостей є актуальним завданням, зокрема для створення засобів телекомунікаційних систем, а також для всіх галузей науки й техніки, де можливо в перспективі застосування хаотичних коливань.

Метою роботи є теоретичні та комп'ютерні схемотехнічні дослідження простого безіндуктивного RC-генератора детермінованого хаосу на двох біполярних транзисторах у режимі розвинутого хаосу з атрактором типу «подвійний завиток» на його фазовій площині.

## Результати дослідження

В роботі [10] запропонована схема RC-генератора хаотичних автоколивань, в якій використовується два транзистора, немає котушок індуктивності, і живлення здійснюється від одного джерела напруги. Як вважають автори, це привабливе і недороге джерело хаотичних коливань для можливих практичних застосувань [11]. Схема отримала широку популярність завдяки тому, що була

представлена і популяризована в мережі Інтернет [12, 13]. Електрична схема простого безіндуктивного RC-генератор детермінованого хаосу наведена на рис. 1 [11-13].

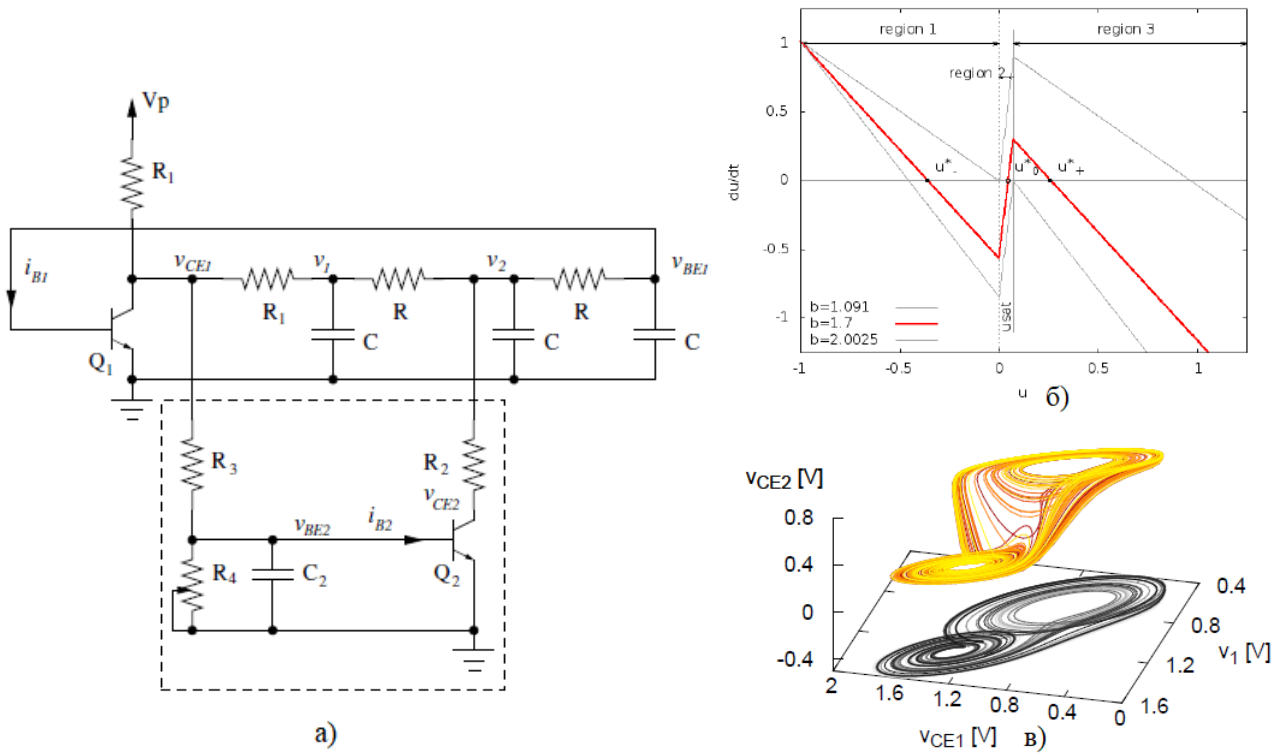


Рис. 1. Електрична схема (а) простого безіндуктивного RC-генератор детермінованого хаосу на двох біполярних транзисторах [10-13], графік ВАХ (б) активного елемента генератора на його фазовій площині [10] та тривимірний вигляд атратора при  $V_p = 5$  В і  $R_4 = 44$  кОм, згенерований на інтервалі часу 5 мс [11]

Прийнявши  $C = C_1 = C_2 = C_3$ , можна записати рівняння, що описують динаміку, у вигляді [12]

$$\begin{cases} RC \frac{dU_1}{dt} = -U_1 \left( 1 + \frac{R}{R_1} - \frac{RR_3}{R_1(2R_3 + R_1)} \right) + U_2 + \frac{RR_3}{2R_3 + R_1} \left( \frac{E}{R_1} - i_c + \frac{v_{BE2}}{R_3} \right), \\ RC \frac{dU_2}{dt} = -2U_2 + U_1 + v_{BE1} - i_c R, \\ RC \frac{dv_{BE1}}{dt} = -v_{BE1} + U_2 - i_{B1} R, \\ (2R_3 + R_1) C_0 \frac{dv_{BE2}}{dt} = -v_{BE2} \frac{R_1 + 2R_3 + 2R_4}{R_4} + U_1 + E - i_{C1} R_1 - i_{B2} (R_1 + 2R_3), \end{cases} \quad (1)$$

де  $U_{1,2}$  - напруги на конденсаторах  $C_1, C_2$ ; струми  $i_{B1}, i_{B2}, i_{C1}, i_{C2}$  визначаються моделлю транзистора, як функції напружень база-емітер і колектор-емітер  $v_{BE1}, v_{BE2}, v_{CE1}, v_{CE2}$  [12].

Компоненти в пунктирному прямокутнику призводять до хаотичної динаміки в іншому стандартному самозбуджуваному RC-генераторі. Компоненти мають такі значення:  $R = 10$  кОм,  $R_1 = 5$  кОм,  $R_2 = 15$  кОм,  $R_3 = 30$  кОм,  $C = 1$  нФ,  $C_2 = 360$  пФ, і  $V_p = 5$  В. Транзистори Q1 і Q2 мають тип BC547C, хоча це не є критичним [11]. Обидва першого резистора RC-ланок і резистора колекторного кола транзистора Q1 були обрані рівними  $\frac{1}{2}R$  [12]. Оскільки вихідний опір підсилювача приблизно дорівнює резистору колекторного кола, тому сумарний опір підсилювача дорівнює  $R$ , таким чином формуючи перший резистор кола зворотного зв'язку. Частота, на якій RC-коло має  $180^\circ$  фазової затримки, необхідних для збудження автоколивань, визначається зі співвідношення [11]

$$f = \frac{\sqrt{6}}{2\pi} RC = 39 \text{ (кГц)}. \quad (2)$$

У нормованих змінних система диференціальних рівнянь (1) має вигляд [10, 11]

$$\begin{cases} \dot{x} = -2x - 1 + y + a - h_a(z, 1 + a + z), \\ \dot{y} = -2y + x + z - h_\beta(u, 2/3(y+1)), \\ \dot{z} = -z + y, \\ \tau \dot{u} = -ub - b + \frac{a}{2} + \frac{1}{2} + \frac{x}{2} - \frac{1}{2} h_a(z, 1 + a + z), \end{cases} \quad (3)$$

де рівняння нормованих змінних автоколивальної системи мають вигляд [10, 11]

$$x = \frac{v_1 - V_T}{V_T}, \quad y = \frac{v_2 - V_T}{V_T}, \quad z = \frac{v_{BE1} - V_T}{V_T}, \quad u = \frac{v_{BE2} - V_T}{V_T}, \quad (4)$$

а рівняння коефіцієнтів динамічної системи (3) мають вигляд [10, 11]

$$a = \frac{V_p}{V_T} = \frac{5}{0.6}, \quad b = 1 + \frac{R_3}{R_4}, \quad \alpha = G_{M1} R_1 = 80, \quad \beta = G_{M2} R = 10. \quad (5)$$

У роботі було проведено комп'ютерне схмотехнічне моделювання простого безіндуктивного RC-генератор детермінованого хаосу на двох біполярних транзисторах у пакеті програм NI Multisim 10.0, що використовує PSPICE моделі радіоелектронних приладів і компонентів (див. рис. 2). Результати комп'ютерного схмотехнічного моделювання простого безіндуктивного RC-генератор детермінованого хаосу на двох біполярних транзисторах протягом 1 мс наведені на рис. 3 і рис. 4.

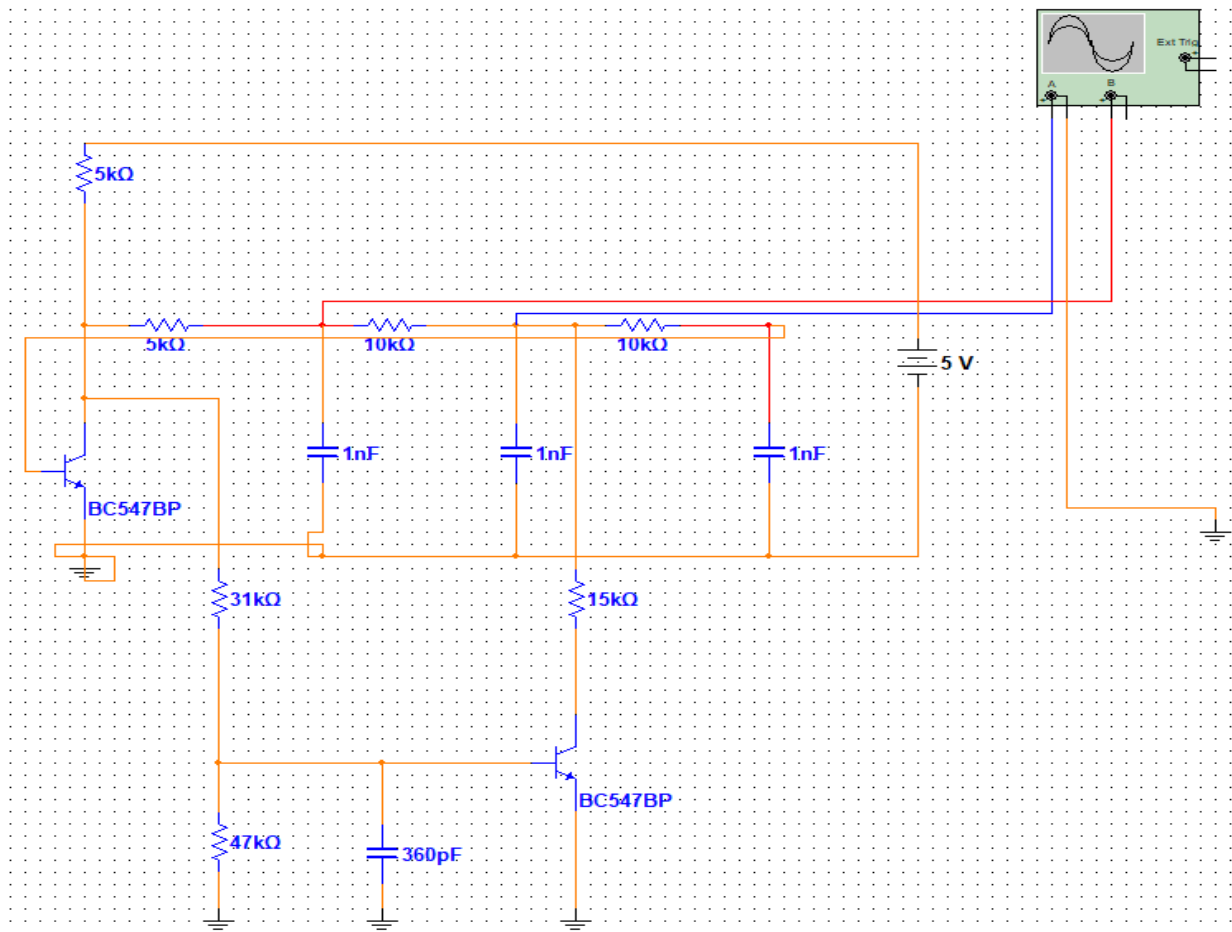


Рис. 2. Електрична схема простого безіндуктивного RC-генератор детермінованого хаосу на двох біполярних транзисторах у пакеті програм NI Multisim 10.0

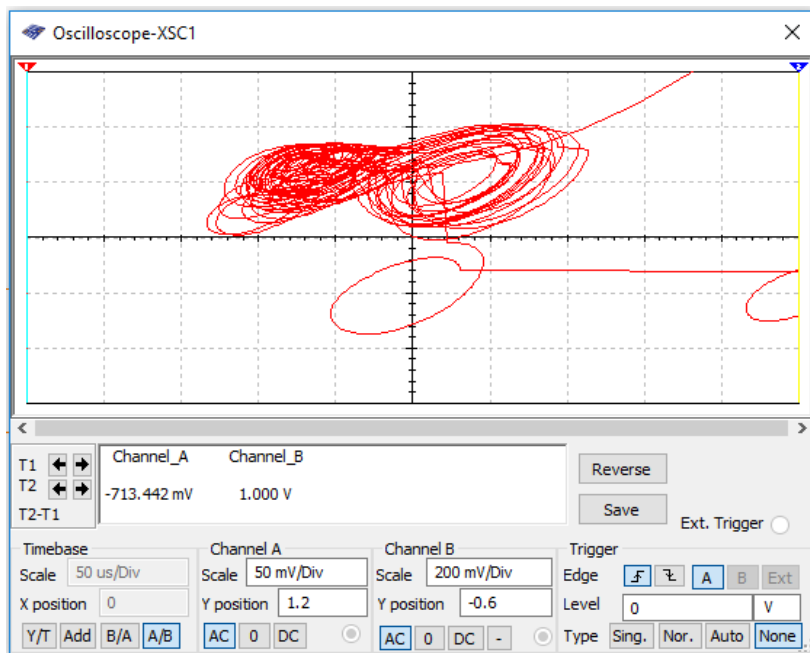


Рис. 3. Фазовий портрет простого безіндуктивного RC-генератор детермінованого хаосу на двох біполярних транзисторах



Рис. 4. Осцилограми генерованих хаотичних напруг простого безіндуктивного RC-генератор детермінованого хаосу на двох біполярних транзисторах

### Висновки

У роботі отримано результати комп'ютерного схемотехнічного дослідження простого безіндуктивного RC-генератора детермінованого хаосу на двох біполярних транзисторах у режимі розвинутого хаосу з атрактором типу «подвійний завиток» на його фазовій площині. Запропоновано якісне пояснення появи хаосу в цій схемі. Еквівалентно схему можна подати як тригер Шмітта, що об'єднаний з генератором за допомогою триланкового RC-кола зворотного зв'язку. Динаміка поведінки складається зі стрибків між двома станами високої і низької напруги колектора Q2. Між цими стрибками напруги спостерігаються зростаючі коливання на колекторі Q1. Зауважимо, що напруга колектора Q2 має майже бінарний розподіл, що притаманне тригеру Шмітта. Струми  $i_{B1}$ ,  $i_{B2}$ ,  $i_{C1}$  та  $i_{C2}$  визначаються за допомогою транзисторної моделі та є функцією напруги база-емітер ( $v_{BE1}$ ,  $v_{BE2}$ ) і напруги колектор-емітер ( $v_{CE1}$  і  $v_{CE2}$ ). Ці напруги формують нелінійні коливання в колі зворотного зв'язку генератора.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Andriy A Semenov, Olena O Semenova, Oleksandr M Voznyak, Oleksandr M Vasilevskiy, Maksym Yu Yakovlev. Routing in telecommunication networks using fuzzy logic. Proceedings of the 2016 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). 30 June–4 July 2016, Erlagol, Russia, pp. 173–177. DOI: 10.1109/EDM.2016.7538719
2. O. Semenova, A. Semenov, K Koval, A. Rudyk, V. Chuhev. Access fuzzy controller for CDMA networks. In: 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 12–13 Sept. 2013, Krasnoyarsk, Russia, pp. 1–2. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693644.
3. Olena Semenova, Andriy Semenov, Pavel Kulakov. Access neuro-fuzzy controller for W-CDMA networks. In: 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 10–13 Oct. 2017, Kharkov, Ukraine, pp. 1–4. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246344
4. Системи рухомого зв'язку : навчальний посібник / О. О. Семенова, А. О. Семенов, В. С. Белов. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 185 с.
5. V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk, A. A. Semenov, E. A. Semenova. Experimental research and simulation of microwave oscillator based on structure of static inductance transistor with negative resistance. In: 2010 20th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", 13–17 Sept. 2010, Sevastopol, Ukraine, pp. 1–2. DOI: 10.1109/CRMICO.2010.5632543
6. Осадчук О.В., Семенов А.О. Дослідження НВЧ генератора електричних коливань на основі транзисторної структури з від'ємним опором. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2005. № 5. – С.149–154.
7. Osadchuk A. V., Semenov A. A., Baraban S. V., Semenova E. A., Koval K. O. Noncontact infrared thermometer based on a self-oscillating lambda type system for measuring the human body's temperature. Proceedings of the 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo). 8–14 Sept. 2013, Sevastopol, Ukraine. 2013. P. 1069–1070. INSPEC Accession Number: 13882857.
8. Осадчук О.В., Барабан С.В., Семенов А.О. Підвищення вірогідності неруйнівного контролю структурних перетворень не-кристалічних напівпровідників. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2012. №2. С. 79 –82.
9. Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Електрично керована еквівалентна ємність на основі транзисторної структури з від'ємним опором. Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. 2008. Вип.1 (25). С. 159–164.
10. Lars Keuninckx, Guy Van der Sande and Jan Danckaert. 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications NOLTA2014, Lu-zern, Switzerland, September 14–18, 2014, pp. 490–493.
11. Keuninckx L., Van der Sande G., Danckaert J. Simple Two-Transistor Single-Supply Resistor–Capacitor Chaotic Oscillator. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2015, vol. 62, no. 9, pp. 891–895. DOI: 10.1109/TCSII.2015.2435211
12. Кузнецов С.П. Простые электронные генераторы хаоса и их схемотехническое моделирование. Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 3. С. 35–61.
13. Build a Chaos Generator in 5 Minutes! [Електронний ресурс]. URL: <https://www.instructables.com/id/A-Simple-Chaos-Generator/>

**Семенов Андрій Олександрович** — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

**Куляс Роман Олексійович** — аспірант кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: romakulyas94@gmail.com

**Пінаєв Богдан Олегович** — аспірант кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: pinaev.bogdam@gmail.com

**Semenov Andriy Oleksandrovych** — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Radio-Frequency Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

**Kulyas Roman Oleksiiovych** — postgraduate student of Departments of Radio-Frequency Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: romakulyas94@gmail.com

**Pinaev Bogdan Olegovich** — postgraduate student of Departments of Radio-Frequency Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: pinaev.bogdam@gmail.com