

О. В. Осадчук
Я. О. Осадчук
В. І. Петренко
К. В. Шикун

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ГЕНЕРАТОР ХАОСУ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНОЇ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі запропоновано нове схемотехнічне рішення оптико-електронного генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, яка має малий час встановлення стаціонарних коливань. За допомогою пакету програм MATLAB здійснено комп'ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі. У порівнянні з аналогами запропонований та досліджений оптико-електронний генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію. Проведено експериментальні дослідження генератора хаосу які підтверджують адекватність розробленої математичної моделі.

Ключові слова: автогенератор, детермінований хаос, транзисторна структура, від'ємний диференціальний опір, оптико-електронний генератор.

OPTO-ELECTRONIC CHAOS GENERATOR BASED ON BIPOLAR TRANSISTOR STRUCTURE

Abstract

The paper proposes a new circuit solution for an optoelectronic generator of deterministic chaos based on a bipolar transistor structure with negative differential resistance, which has a short settling time for stationary oscillations. Using the MATLAB program package, a computer circuit study of the parameters and characteristics of the generated electrical oscillations in a chaotic mode was carried out. In comparison with analogues, the proposed and investigated optoelectronic generator of deterministic chaos has improved load capacity and higher speed. Experimental studies of the chaos generator have been conducted, which confirm the adequacy of the developed mathematical model.

Keywords: oscillator, deterministic chaos, transistor structure, negative differential resistance, optoelectronic generator.

Використання генераторів хаосу в розробці систем зв'язку вивчається останні 25 років. Однією з головних переваг хаотичних систем зв'язку є підвищена безпека [1–3]. Коли хаотичні коливання використовуються як несучий сигнал, важко виявити їх присутність та декодувати інформацію, оскільки важко передбачити характеристики хаотичного сигналу. Використання хаотичної синхронізації в схемах зв'язку з когерентним детектуванням ще більше підвищує безпеку, оскільки вимагає наявності генератора хаосу з ідентичними параметрами та конструкцією на приймачі для синхронізації та демодуляції переданих бітів даних [4, 5]. Крім того, хаотичний сигнал важко перехопити, і він має відносно добру стійкість до багатопроменевого поширення та цілеспрямованих перешкод [6]. Ці властивості хаотичних систем роблять їх перспективними та цікавими для застосувань безпечного зв'язку в електронно-комунікаційних та радіотехнічних системах загального та спеціального призначення.

Властивості хаосу, наприклад, ергодичність та чутливість системи до її початкових умов і параметрів, застосовуються для створення різних типів систем, найважливішими з яких є криптосистеми та системи зв'язку [7]. Використання хаосу в криптосистемі є значним у цифровому світі через зростаючу потребу в різних секторах захищати конфіденційну та особисту інформацію від несанкціонованого доступу під час її зберігання або передачі мережею [3–6]. Зокрема, поширення використання зображень у багатьох секторах, таких як військова справа, охорона здоров'я та безпека, вимагає належного захисту цих чутливих та приватних зображень. Отже, проблема захисту інформації про зображення останнім часом стала привабливою темою для дослідників, що призвело до пропозиції різних методів шифрування зображень. За останні кілька років було проведено багато досліджень

шифрування зображень та передачі інформативних сигналів на основі хаосу та систем безпечного зв'язку в електронно-комунікаційних та радіотехнічних системах.

Хаос – це помітне явище, що виникає внаслідок нелінійних динамічних систем. По суті, хаос – це нерегулярна та непередбачувана еволюція в часі нелінійних динамічних систем, за якої траєкторії, що виходять з дуже близьких початкових точок, розходяться експоненціально. Єдиною границею обмеження кодування хаотичних оптико-електронних сигналів є здатність одержувачів розрізняти різні хаотичні стани.

Електричні схеми оптико-електронних генераторів детермінованого хаосу повинні бути достатньо простими, щоб їх можна було синхронізувати. Особливістю генерування та формування сигналів детермінованого хаосу аналоговими пристроями є використання їхніх нелінійних статичних або динамічних характеристик [7–10]. Простота схемних рішень генераторів детермінованого хаосу є необхідною умовою для зменшення нестабільностей в роботі електронних і оптичних приладів, які зумовлені концентрацією домішок, швидкістю рекомбінації носіїв, дефектів кристала та інші, що призводить до переходу автоколивальної системи від хаотичних коливань до стохастичних. У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в оптико-електронному генераторі на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Нелінійна динаміка електричних коливань формується завдяки нелінійності другого порядку статичної ВАХ діода та нелінійного послідовного коливального кола, реактивними елементами якого є індуктивність котушки та еквівалентна ємність р-п переходу. Описуючи динамічні процеси у такому колі, потрібно врахувати, що еквівалентна ємність діода різна для додатного та від'ємного півперіодів синусоїдального коливання (відповідно дифузійна та бар'єрна ємності р-п переходу), а також те, що діод пропускає струм лише у прямому зміщенні [6].

При підключенні опору навантаження потрібно враховувати внесений нею активний та реактивний опір до коливального контуру генератора. Застосування світлодіода дозволяє здійснити гальванічну розв'язку виходу генератору детермінованого хаосу з навантаженням. У цьому випадку генератор працює в режимі холостого ходу по основному виходу, що дозволяє широко його використовувати у схемах пристроїв електронно-комунікаційних та радіотехнічних систем загального та спеціального призначення. Для аналізу статистичних характеристик генерованих хаотичних імпульсів розроблена математична модель, подальші обчислення якої здійснені в MATLAB R2018a. На рис. 1 наведені експериментальні осцилограми хаотичних коливань оптико-електронного генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором.

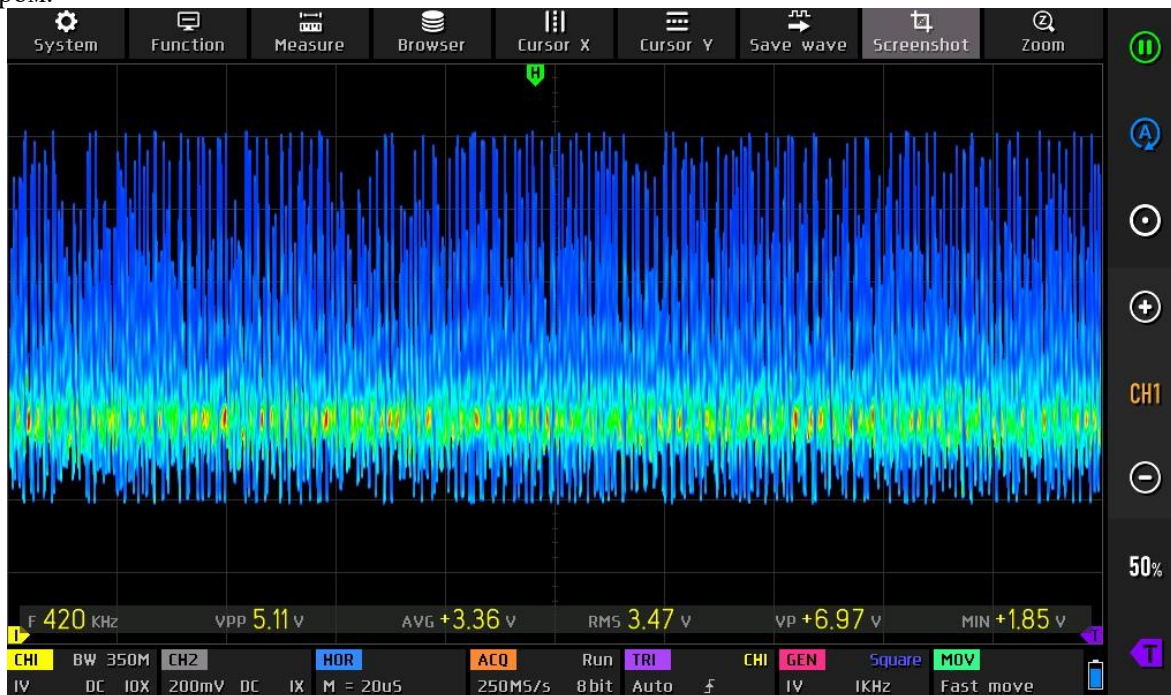


Рис. 1. Осцилограми оптико-електронного генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури

Оскільки генератор детермінованого хаосу побудований на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором і може працювати в широкому діапазоні частот, були проведені експериментальні дослідження від низьких частот до мікрохвильових частот для визначення оптимальних робочих частот для різних задач використання розробленого пристрою. Вихідний сигнал розробленого генератора хаосу генерується в діапазоні від 1.5 кГц до 12,75 МГц, що дозволяє отримувати високу точність перетворення і синхронізації з паралельними потоками даних від кількох пристроїв приймання і передавання. На рис. 2 наведено експериментальну спектрограму оптико-електронного генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури. Розроблено експериментальний зразок генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів BFR92 і BFT93, що утворюють напівпровідникову структуру з від'ємним диференціальним опором.

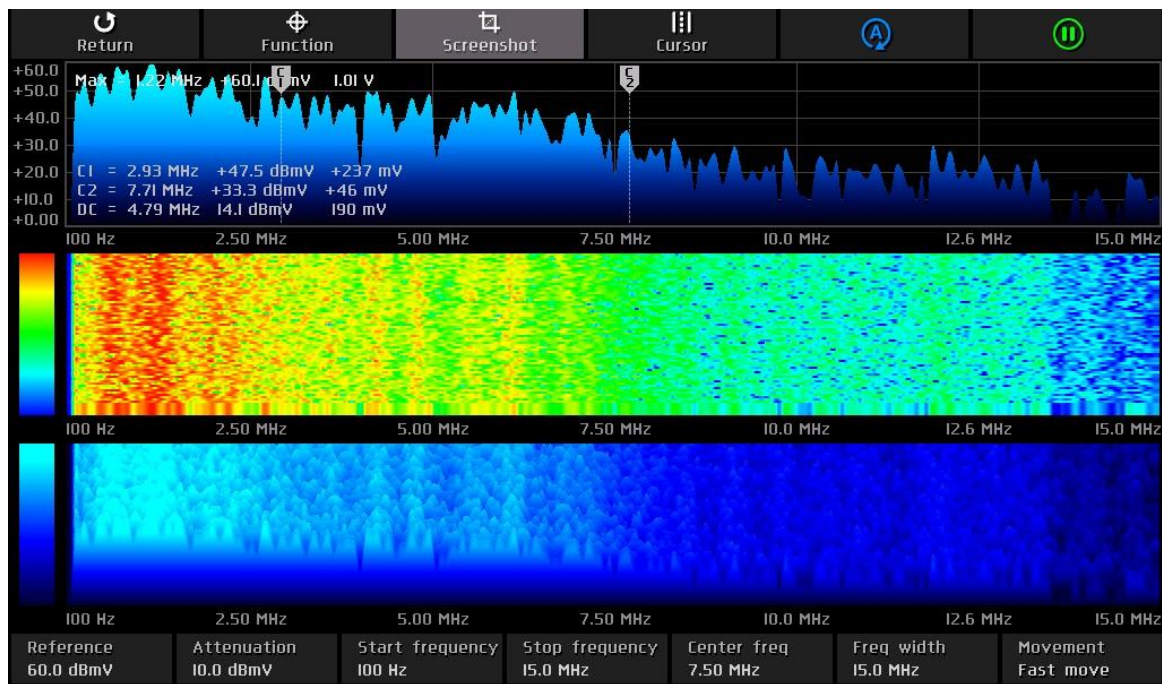


Рис. 1. Експериментальна спектрограми оптико-електронного генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано нове схемотехнічне рішення оптико-електронного генератору детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, яка має малий час встановлення стаціонарних коливань. За допомогою пакету програм MATLAB здійснено комп'ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі. У порівнянні з аналогами запропонований та досліджений оптико-електронний генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію. Проведено експериментальні дослідження генератора хаосу які підтверджують адекватність розробленої математичної моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mukherjee, S. New Insights Into Chaos Based Image Encryption & Its Application. *J. Math. Sci. Comput. Math.* 2023, 4, 241–264.
2. Saifullah, S.; Ali, A.; Goufo, E.F.D. Investigation of complex behaviour of fractal fractional chaotic attractor with mittag-leffler Kernel. *Chaos Solitons Fractals* 2021, 152, 111332.
3. Lin, H.; Wang, C.; Sun, Y.; Wang, T. Generating n-Scroll Chaotic Attractors From a Memristor-Based Magnetized Hopfield Neural Network. *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs* 2023, 70, 311–315
4. Wu, Y.; Qiao, S.; Yao, D. A hybrid chaotic controller integrating hip stiffness modulation and reinforcement learning-based torque control to stabilize passive dynamic walking. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Mech. Eng. Sci.* 2023, 237, 673–691.

5. Sidiropoulos A, Konstantinidis D, Karamanos X, Mastos T, Apostolou K, Chatzis T, Papaspyropoulou M, Marini K, Karamitsos G, Theodoridou C, et al. A Novel Autonomous Robotic Vehicle-Based System for Real-Time Production and Safety Control in Industrial Environments. *Computers*. 2025; 14(5):188.
6. Семенов А. О., Осадчук О. В. Генератор детерминированного хаоса с инерционной нелинейностью на основе биполярной транзисторной структуры с від'ємним опором. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 6. С. 147–152.
7. Andriy O. Semenov, Alexander V. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Kosty-antyn O. Koval, Maksym O. Prytula. The Chaos Oscillator with Inertial Non-Linearity Based on a Transistor Structure with Negative Resistance. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016*. Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July, 2016. Conference Proceedings, 2016. – P. 178–184.
8. Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal*. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp). 2021.
9. Osadchuk I.A., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Semenov A.O. Optical Sensor with Frequency Output Based on Resonant Tunneling Diode. *Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022*, 2022, pp. 442-446.
10. Osadchuk V., Osadchuk A., Semenov A., Osadchuk I., Semenova O., Baraban S., Prytula M.. Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Data-Centric Business and Applications ICT Systems-Theory, Radio-Electronics, Information Technologies and Cybersecurity*, (Volume 5). Chapter 12. Springer International Publishing. Cham. Editors: Tamara Radivilova, Dmytro Ageyev, Natalia Kryvinska. 2020, pp.229-261.

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Осадчук Ярослав Олександрович – д.т.н., доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Петренко Віталій Іванович – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Шукун Костянтин Віталійович – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

Osadchuk Iaroslav Oleksandrovych - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

Petrenko Vitaliy Ivanovych – postgraduate student of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Shykun Kostyantyn Vitaliyovych – postgraduate student of the Department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.