
ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРІ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

УДК 621.382

О.В. ОСАДЧУК, Я.О.ОСАДЧУК, В.І. ПЕТРЕНКО, В.К. СКОЩУК

РОЗРОБКА ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, м. Вінниця, Україна, e-mail:osadchuk.av69@gmail.com

Анотація. У роботі запропоновано та досліджено нове схемотехнічне рішення генератору детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Сфера передачі даних розширилася за останні роки завдяки швидкому розвитку комунікаційної інфраструктури, такої як мобільні та інтернет-мережі. Забезпечення безпечної передачі даних у електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладах і системах має вирішальне значення для підтримки безпеки та реалізації повного потенціалу цих інфокомунікаційних технологій. Серед перспективних розробок у безпеці фізичного рівня в передачі даних є інтеграція теорії хаосу, яка підвищує безпеку, використовуючи властиву хаотичним сигналам непередбачуваність. У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в напівпровідниковому генераторі на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності транзисторної структури між колекторами першого та другого біполярних транзисторів, а третя це струм, який протікає через індуктивність коливального контуру. Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Розроблено математичну модель генератора детермінованого хаосу у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку на основі методу змінних стану, яка дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги живлення та керування, а також параметрів основних елементів автогенератора в будь-якій точці схеми в заданий момент часу. 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 генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію має малий час встановлення стаціонарних коливань.

Ключові слова: генератор детермінованого хаосу, автогенератор, детермінований хаос, транзисторна структура, від'ємний диференціальний опір.

Abstract. The paper proposes and investigates a new circuit solution for a deterministic chaos generator based on a bipolar transistor structure with negative differential resistance. The field of data transmission has expanded in recent years due to the rapid development of communication infrastructure, such as mobile and Internet networks. Ensuring secure data transmission in electronic communication and radio engineering devices and systems is crucial for maintaining security and realizing the full potential of these infocommunication technologies. Among the promising developments in physical-level security in data transmission is the integration of chaos theory, which increases security by using the unpredictability inherent in chaotic signals. The paper considers the possibility of obtaining a chaotic mode in a semiconductor generator based on a bipolar transistor structure with negative differential resistance. This chaos generator system has three dynamic variables: the voltage on the equivalent capacitance of the transistor structure between the collectors of the first and second bipolar transistors, and the third is the current flowing through the inductance of the oscillatory circuit. The dynamic processes of deterministic chaos are determined by the reactive properties of the transistor structure with negative differential resistance. A mathematical model of the deterministic chaos generator has been developed in the form of a system of first-order differential equations based on the state variable method, which allows determining the value of the output signal frequency depending on the supply and control voltages, as well as the parameters of the main elements of the oscillator at any point in the circuit at a given time. Using the MATLAB program package, a computer circuit engineering study of the parameters and characteristics of the generated electrical oscillations in a chaotic mode was carried out.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

In comparison with analogues, the proposed and investigated deterministic chaos generator has improved load capacity and higher speed, has a short time for establishing stationary oscillations.

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

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-247-256

ВСТУП

Сфера передачі даних розширилася за останні роки завдяки швидкому розвитку комунікаційної інфраструктури, такої як мобільні та інтернет-мережі [1]. Основною мотивацією для цього розвитку є полегшення контролю, збору та обробки інформаційних даних для промислових, аерокосмічних, військових, медичних, сільськогосподарських та багатьох інших застосувань, [2-6]. Збільшення об'ємів передачі й обробки даних та залежність від взаємопов'язаних пристроїв створює проблеми безпеки. Комп'ютерні системи та мережі за своєю суттю вразливі до широкого спектру загроз безпеці та атак.

Детермінований хаос це досить поширене явище, яке спостерігається в динамічних системах з неперервним часом, що описуються нелінійними диференціальними рівняннями. Хаотичні системи є важливими в широкому спектрі застосувань, включаючи, але не обмежуючись, моделювання роботів, керування рухом [6], а також генерацію випадкових чисел і шифрування [7]. Хаотичні системи мають кілька переваг, таких як чутливість до параметрів і початкових умов. Крім того, неперіодична природа хаотичних систем робить їх ідеальними для використання в системах шифрування [8, 9].

Використання хаотичної криптографії для захисту інформативних сигналів було запропоновано для вирішення численних проблем безпеки комп'ютерних систем і мереж загального та спеціального призначення [8 – 10].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Серед перспективних розробок у безпеці фізичного рівня в передачі даних є інтеграція теорії хаосу, яка підвищує безпеку, використовуючи властиву хаотичним сигналам непередбачуваність. Методи зв'язку на основі хаосу пропонують досить гарне рішення для безпечної передачі даних, особливо в сенсорних мережах Інтернету речей та комп'ютерних системах спеціального призначення, де пристрої мають обмежені обчислювальні та енергетичні ресурси [11].

Квантові кроки мають переваги детермінізму та високої чутливості до початкових умов. Ці характеристики створюють можливості для нового підходу до квантових хеш-функцій, матриць заміщення та генераторів псевдовипадкових чисел. Ці компоненти є невід'ємною частиною реалізації протоколів квантового шифрування та автентифікації. Авторами, у роботі [12] запропонована матриця заміщення, яка отримана з серії випадкових значень, згенерованих шляхом виконання одновимірних одночастинкових квантових кроків на круговому шляху. Потім вони були розташовані в послідовному порядку, причому індекси їхніх відповідних позицій зрештою склали матрицю заміщення. Чотиривимірна багатопрокрутка модифікована нейронна мережа Хопфілда, що використовує поліноми знакової функції [13]. У роботі [14] автори розробили інноваційний мемристор, що включає мемпроекцію полінома знакової функції. Дослідники включили його в модель Ходжкіна-Хакслі, створивши мемристивну систему, яка може генерувати багатопрокруткові аттрактори.

Однак хаотичні системи є детермінованими, що означає, що динаміка системи не є випадковою, як шум, і тому може бути контрольовано використана. Хаотичні системи базуються на нелінійності та можуть мати різні фізичні реалізації. У літературі осцилятори хаосу - це малопотужні аналогові схеми, які демонструють хаотичну поведінку та спеціально розроблені для роботи як джерело хаотичних сигналів [11-13].

Метою роботи є розробка та дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якому втрати енергії в коливальній системі компенсуються енергією диференційного від'ємного опору.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Схемотехнічні рішення напівпровідникових 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. Простота схемних рішень напівпровідникових генераторів детермінованого

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

хаосу є необхідною умовою для зменшення нестабільностей в роботі електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладів, систем і мереж.

В ході аналізу вибору оптимального варіанта схемотехнічного рішення генератора детермінованого хаосу для телекомунікаційних та радіотехнічних пристроїв і систем, доцільно використовувати частотний метод перетворення інформаційного сигналу, який дозволяє підвищити вихідну потужність генератора хаосу, а також розширити частотний діапазон генерованого хаотичного сигналу [15-18]. Теоретичні дослідження показали, що в якості схем автогенераторів детермінованого хаосу доцільно використовувати схемотехнічні рішення генераторних схем на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором [19 – 23], які реалізують частотний принцип перетворення інформаційного сигналу. Від'ємний опір забезпечується внутрішнім зворотним зв'язком біполярної транзисторної структури і слугує компенсацією втрат енергії в коливальному контурі. Імпеданс такої біполярної транзисторної структури, в залежності від виду його вольт-амперної характеристики, носить ємнісний або індуктивний характер, а його величина залежить від напруги живлення та керування.

У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в напівпровідниковому генераторі на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, електрична схема якого представлена на рис. 1. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності транзисторної структури між колекторами першого та другого біполярних транзисторів VT1 та VT2, а третя це струм, який протікає через індуктивність L1.

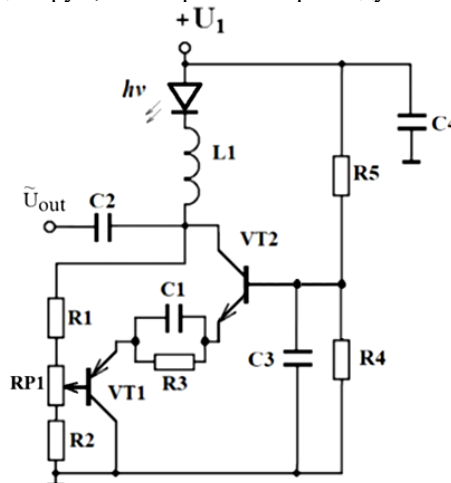


Рисунок 1 – Електрична схема генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури

Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Для зміни динаміки хаотичних коливань, а також розширення фазового простору, додано послідовний ланцюг з резистора R4 та ємності C3, до індуктивної вітки базової схеми генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором також додано коло з послідовно включених світловипромінюючим діодом. Для термостабілізації роботи генератора детермінованого хаосу введено ланцюг з паралельного включення ємності C1 та резистора R3. Номінали електронних компонентів обираються з наступних міркувань це забезпечення максимальної протяжності спадаючої ділянки статичної вольт-амперної характеристики транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором та забезпечення широкої зміни еквівалентної ємності самої транзисторної структури.

Генерована хаотична напруга знімається із колектора біполярного транзистора VT2. В даному випадку хаотична динаміка контролюється зміною напруги на базі біполярного транзистора підстроювальним резистором RP1. Під час підключення опору навантаження, необхідно враховувати внесений нею активний та реактивний опір до коливального контуру генератора хаоса на основі біполярної транзисторної структури. Застосування світлодіоду дозволяє здійснити гальванічну розв'язку виходу генератора детермінованого хаосу з навантаженням. У цьому випадку генератор працює в режимі холостого ходу по основному виходу, що дозволяє широко його використовувати у схемах електронно-комунікаційних та радіотехнічних пристроїв та систем. Сімейство експериментальних статичних та

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

динамічних вольт-амперних характеристик генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором подано на рис.2.

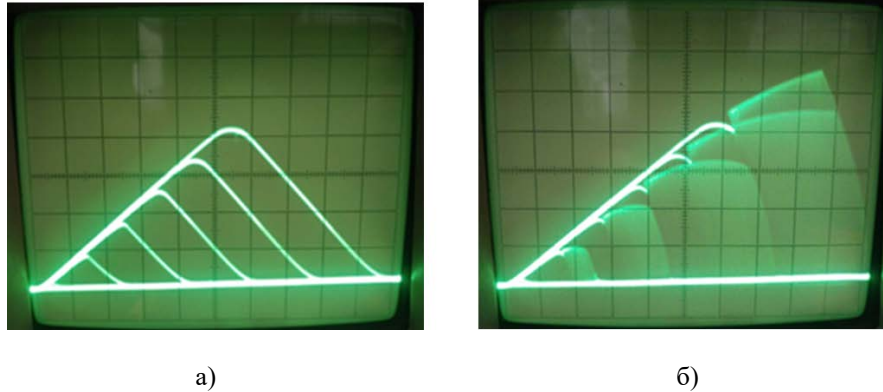


Рисунок 2 – Сімейство експериментальних статичних (а) та динамічних (б) ВАХ генератора детермінованого хаосу (по вертикальній осі одна поділка – 1мА, а по горизонтальній осі – 1В)

Коло з резистора R5 та конденсатора C3 створює додатний зворотній зв'язок виходу генератора детермінованого хаосу з входом, що збільшує диференціальний від'ємний опір у коливальній системі пристрою. Конденсатор C4 запобігає проходженню змінного струму через джерело напруги U1. Для аналізу статистичних характеристик генерованих хаотичних імпульсів розроблена математична модель, подальші обчислення якої здійснені в MATLAB R2018a.

Для побудови математичної моделі генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури застосовано метод змінних стану, який дозволяє визначити значення напруг і струмів елементів кола в кожний момент часу. З метою розгляду властивостей запропонованої схеми і створення її математичної моделі, було створено нелінійну еквівалентну схему. Обравши напрямки обходу контурів і позначивши відповідні струми, розроблено систему рівнянь за законами Кірхгофа. Отриману систему рівнянь використано для аналізу схеми методом змінних стану.

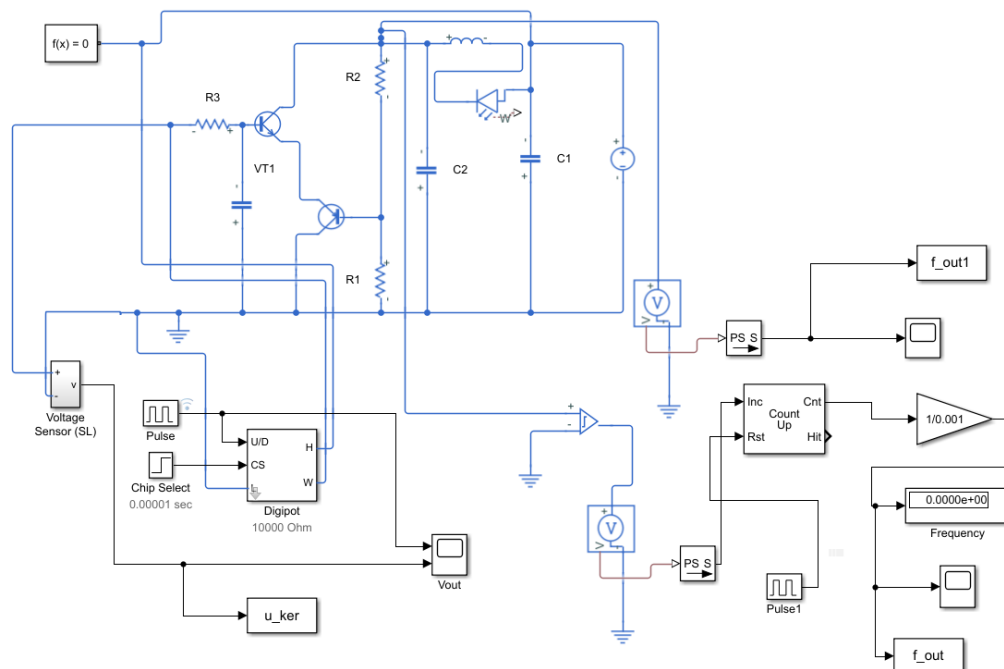


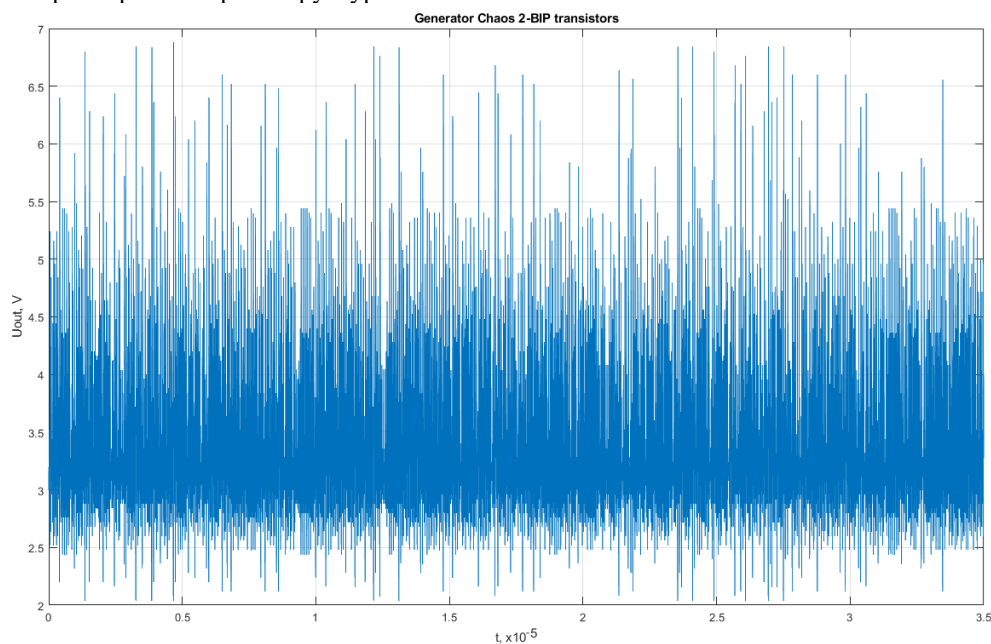
Рисунок 3 – Схема генератор детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури для моделювання динамічних характеристик

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

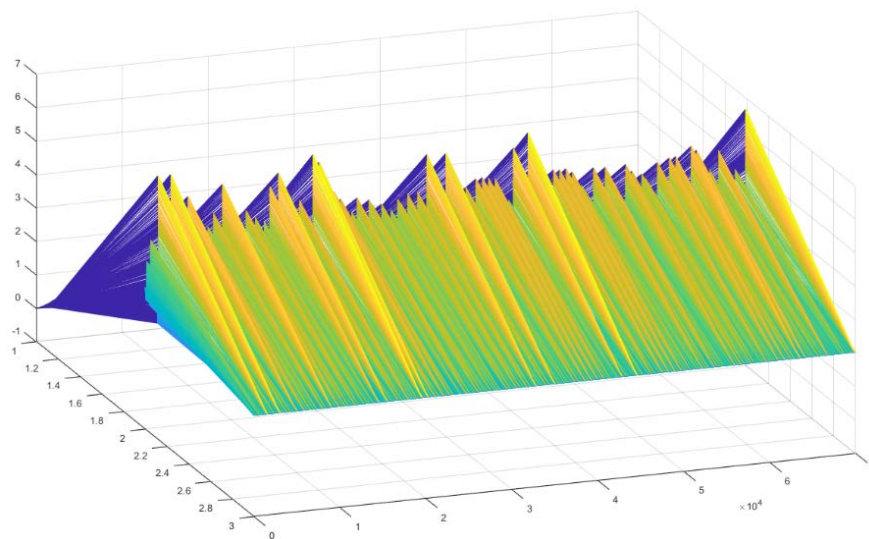
Хаос можна описати як випадковий вихідний сигнал, який можна змодельовати та відтворити за допомогою певної системи рівнянь, якщо початкові умови відомі. Виходи хаотичних систем, дуже чутливі до початкових умов системи, причому незначні коливання призводять до різких змін у вихідній моделі. Хаотичні системи формально визначаються як такі, що мають принаймні один додатний показник Ляпунова. Показник Ляпунова кількісно визначає швидкість розділення нескінченно близьких траєкторій. Іншими словами, хаотична система буде відхилятися між кількома ітераціями з малими збуреннями.

Динамічна модель генератора детермінованого хаосу дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги керування, а також параметрів основних елементів автогенератора в будь-який момент часу. За допомогою пакету програм MATLAB Simulink [24] здійснено комп'ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі (рис.3).

На рис.4 представлено промодельований вихідний сигнал генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури.



а)



б)

Рисунок 4 – Промодельований вихідний сигнал генератора детермінованого хаосу а) 2D; б) 3D

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

За допомогою Signal Processing Toolbox проведено спектральний аналіз розробленого генератора детермінованого хаосу, які дозволяють характеризувати частотний склад сигналу. Непараметричні методи на основі швидкого перетворення Фур'є, параметричні та підпросторові методи враховують попереднє знання сигналу і достатньо точно описують поведінку генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури. Обчислені спектри потужності нерівномірно дискретизованих сигналів представлені на рис.4. Промодельована подібність сигналу у частотній області, оцінюючи їх спектральну когерентність, що дозволило візуалізувати та порівняти часово-частотний склад нестационарних сигналів. Отримано точні спектральні оцінки за допомогою перепризначення та синхронізаційного стискання Фур'є. На рис.5 представлені крос-спектрограми, розподілу Вігнера-Вілля та спектри персистенції. Оцінено спектральну потужність в часово-частотному представленні сигналу (рис.6), миттєву частоту, миттєву ширину смуги пропускання (рис.7), спектральний ексцес та спектральну ентропію.

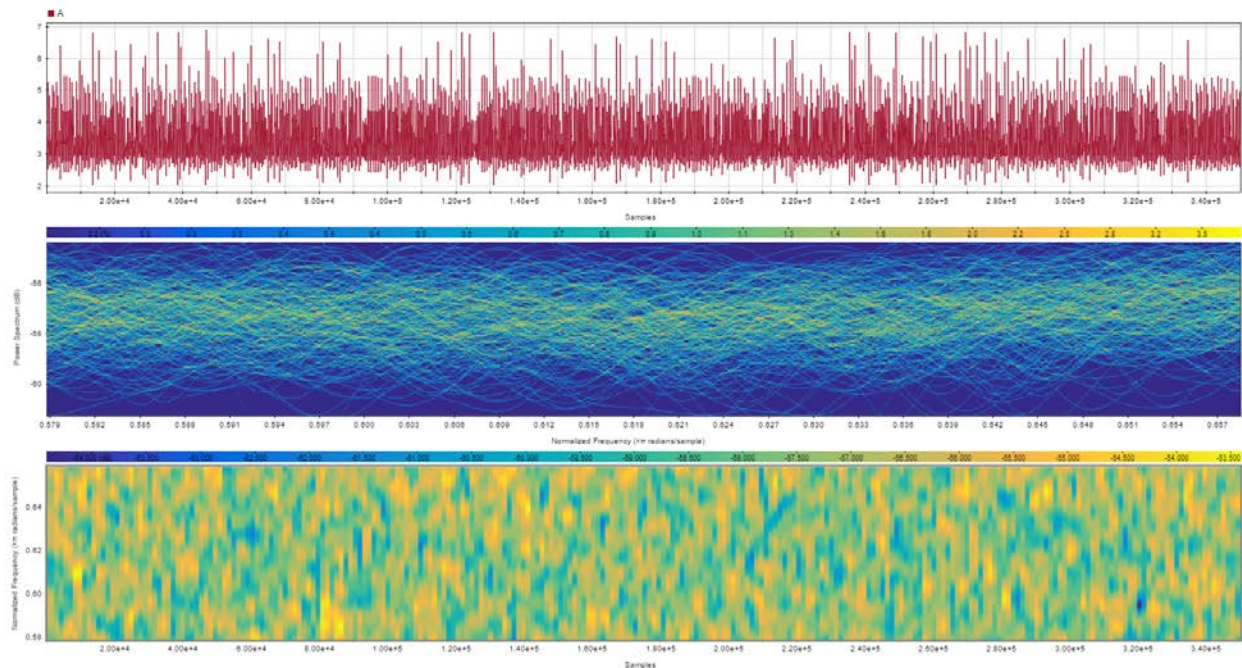


Рисунок 5 – Крос-спектрограми розподілу Вігнера-Вілля та спектри персистенції

Фундаментальна характеристика динамічного хаотичного сигналу, а саме подібність до розширеного спектру, має кілька корисних властивостей для електронно-комунікаційних та радіотехнічних систем [25]. Загалом, його наявність важко виявити, і, отже, його легко приховати від неавторизованих приймачів. Крім того, важко перехопити переданий хаотичний сигнал, і він стійкий до глушіння [26]. Крім того, він пропонує певну стійкість до спотворень через багатопроменеве поширення, що можна пояснити нижчою взаємною кореляцією між двома зміщеними в часі сегментами хаотичної форми сигналу порівняно з періодичними сигналами [26]. Генеруючий хаотичний широкосмуговий сигнал має щільний набір нестабільних періодичних орбіт, які пропонують діапазон частот, що утворюють плоску функцію щільності ймовірності, що означає, що хаотичні системи використовують вхідну енергію для генерації шумоподібних широкосмугових сигналів. Це гарна властивість для передавального сигналу, особливо якщо врахувати вхідну енергію, що забезпечується зовнішніми збуреннями, а саме мультиплікативним шумом, присутнім у каналі передачі, тому були проведені експериментальні дослідження спектрів вихідного сигналу генератора хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним опором.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

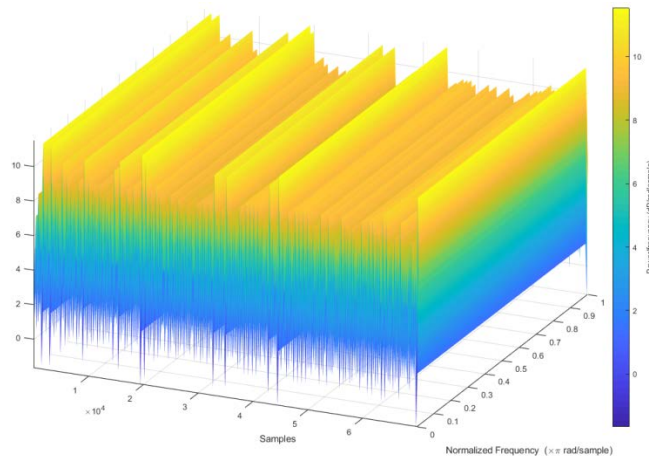


Рисунок 6 – 3D спектральна потужність в часово-частотному представленні сигналу

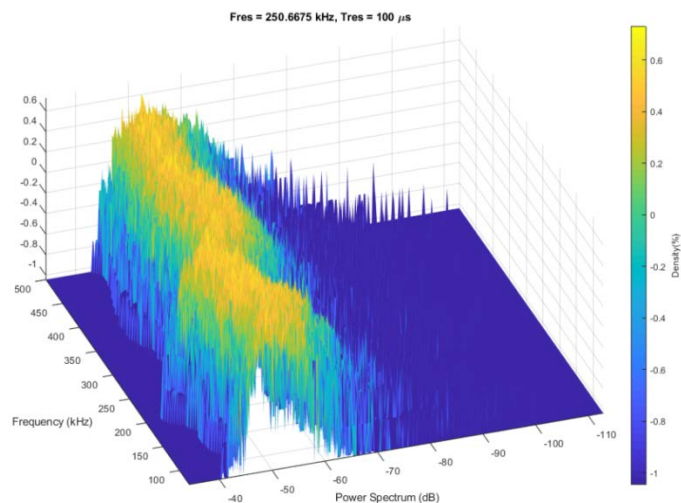


Рисунок 7 – Миттєва ширина смуги пропускання в часово-частотному представленні сигналу

Проведені експериментальні дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором показали, що дане схемотехнічне рішення дозволяє зменшити час встановлення стаціонарних коливань та розширити частотний діапазон хаотичних коливань. На рис.8 представлено фазовий портрет генератора у площині динамічних змінних. На рис.9 наведені експериментальні осцилограми хаотичних коливань генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури.

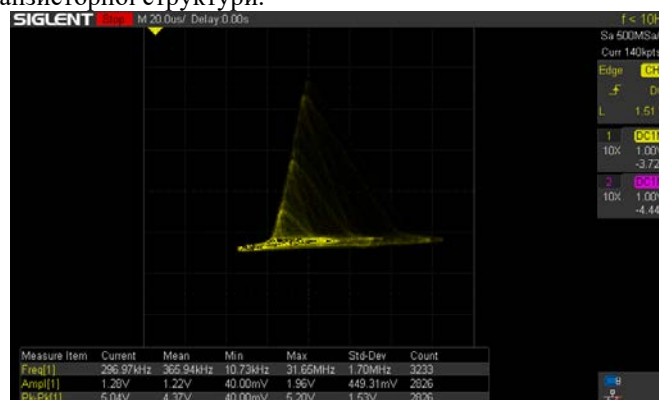
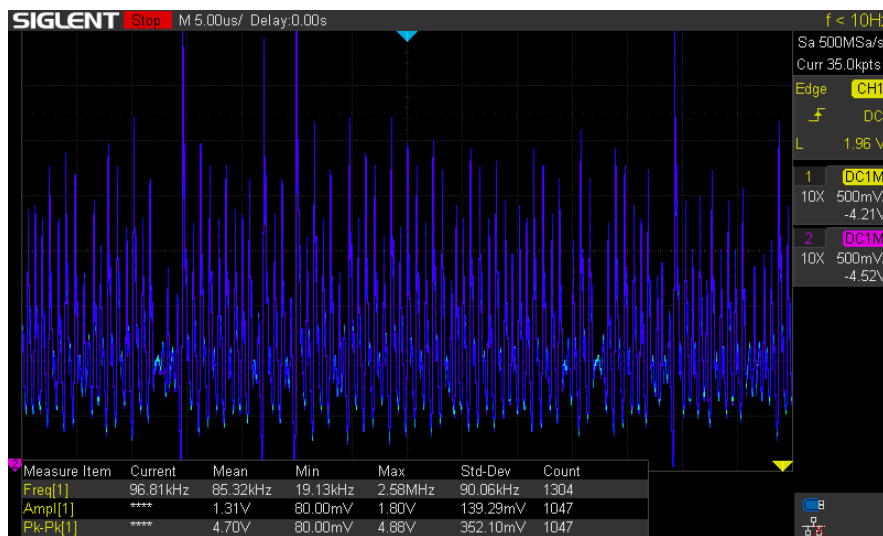
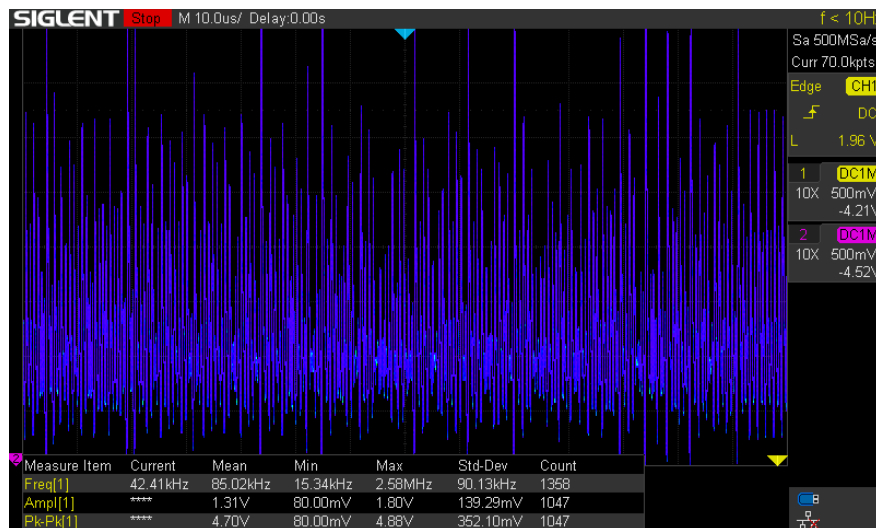


Рисунок 8 – Фазовий портрет генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури у площині динамічних змінних

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ



a)



b)

Рисунок 9 – Осцилограми генератора детермінованого хаосу: а) напруга живлення 5 В, напруга керування 2,5 В; б) напруга живлення 5 В, напруга керування 3,5 В

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано та досліджено нове схмотехнічне рішення генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності транзисторної структури між колекторами першого та другого біполярних транзисторів, а третя це струм, який протікає через індуктивність коливального контуру. Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Розроблено математичну модель генератора детермінованого хаосу у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку на основі методу змінних стану, яка дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги живлення та керування, а також параметрів основних елементів автогенератора в будь-якій точці схеми в заданий момент часу. За допомогою пакету програм MATLAB здійснено комп'ютерне схмотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі. У порівнянні з аналогами запропонований та досліджений генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію має малий час встановлення стаціонарних коливань.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Magyari A., Chen Y. Review of State-of-the-Art FPGA Applications in IoT Networks. *Sensors* 2022, 22, 7496.
2. Hussain F., Hussain R., Hassan S.A., Hossain E. Machine Learning in IoT Security: Current Solutions and Future Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 2020, 22, 1686–1721.
3. Rawat D.B., Doku R., Garuba M. Cybersecurity in Big Data Era: From Securing Big Data to Data-Driven Security. *IEEE Trans. Serv. Comput.* 2021, 14, 2055–2072.
4. Sychowiec J., Zieliński Z. A Blockchain-Based Framework for Secure Data Stream Dissemination in Federated IoT Environments. *Electronics*. 2025; 14(10):2067. <https://doi.org/10.3390/electronics14102067>
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. <https://doi.org/10.3390/computers14050188>
6. Vaseghi, B.; Pourmina, M.A.; Mobayen, S. Finite-time chaos synchronization and its application in wireless sensor networks. *Trans. Inst. Meas. Control* 2018, 40, 3788–3799.
7. Sun P., Shen S., Wan Y., Wu Z., Fang Z., Gao X.Z. A Survey of IoT Privacy Security: Architecture, Technology, Challenges, and Trends. *IEEE Internet Things J.* 2024, 11, 34567–34591.
8. Sauter T., Treytl A. IoT-Enabled Sensors in Automation Systems and Their Security Challenges. *IEEE Sensors Lett.* 2023, 7, 1–4.
9. Cirjulina D., Babajans R., Kolosovs D. Design Particularities of Quadrature Chaos Shift Keying Communication System with Enhanced Noise Immunity for IoT Applications. *Entropy*. 2025; 27(3):296.
10. Kaddoum G., Tadayon N. Differential Chaos Shift Keying: A Robust Modulation Scheme for Power-Line Communications. *IEEE Trans. Circuits Syst. II* 2017, 64, 31–35.
11. Lin Y., Xie Z., Chen T., Cheng X., Wen H. Image privacy protection scheme based on high-quality reconstruction DCT compression and nonlinear dynamics. *Expert Syst. Appl.* 2024, 257, 124891.
12. Ludovico Minati. Atypical transistor-based chaotic oscillators: Design, realization, and diversity / Ludovico Minati, Mattia Frasca, Paweł Oświęcimka, Luca Faes, Stanisław Drożdż. *CHAOS*. – 2017. – Vol. 27, 073113 (2017). – pp. 073113-1 – 073113-13.
13. Saber A. Security Analysis of Chaos Based Communication Systems; Carleton University: Ottawa, ON, Canada, 2007.
14. Anzo-Hernández A., Zambrano-Serrano E., Platas-Garza MA, Volos C. Dynamic Analysis and FPGA Implementation of Fractional-Order Hopfield Networks with Memristive Synapse. *Fractal and Fractional*. 2024; 8(11):628. <https://doi.org/10.3390/fractalfract8110628>
15. Litvinenko A., Aboltins A., Pikulins D., Eidaks J. Frequency Modulated Chaos Shift Keying System for Wireless Sensor Network. In *Proceedings of the 2020 Signal Processing Workshop, SPW*, Warsaw, Poland, 5–7 October 2020.
16. Petrzela J., Chaotic States of Transistor-Based Tuned-Collector Oscillator. *Mathematics* 2023, 11, 2213.
17. Petrzela J., Polak L. Minimal realizations of autonomous chaotic oscillators based on trans-immittance filters. *IEEE Access* 2019, 7, 17561–17577.
18. Valencia-Ponce M.A., Tlelo-Cuautle E., Gerardo de la Fraga L. Estimating the highest time-step in numerical methods to enhance the optimization of chaotic oscillators. *Mathematics* 2021, 9, 1938.
19. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Piotr Kisała, Karlygash Nurseitova. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 111761I, pp.1-12. 2019.
20. 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.
21. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of a Frequency Pressure Transducer Based on a Resonant Tunneling Diode. *Physics and chemistry of solid state*. V.23, No. 2 (2022) pp.277-284.
22. 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.
23. Osadchuk V., Osadchuk A., Semenov A., Osadchuk I., Semanova O., Baraban S., Prytula M. Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

- 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.
24. <https://uk.mathworks.com/help/simulink/index.html>
25. Marc M. Sepantaie, Nader M. Namazi, and Amir M. Sepantaie. Spectral analysis and implementation of secure chaotic free-space optical communication systems. *Optical Engineering* 57(10), 106101 (5 October 2018).
26. Shi, B.; Sui, T.; Zhang, T.; Jiang, Q. A Spread Spectrum Parameter Optimization Analysis for Differential Chaotic Shift Keying. In *Proceedings of the ICMLCA 2021 2nd International Conference on Machine Learning and Computer Application*, Shenyang, China, 17–19 December 2021; Volume 9, pp. 7–11.

Надійшла до редакції 27.04.25 р.

ОСАДЧУК ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: osadchuk.av69@gmail.com**

ОСАДЧУК ЯРОСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: osadchuk.j93@gmail.com**

ПЕТРЕНКО ВІТАЛІЙ ІВАНОВИЧ – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: kaf.rt.vntu@gmail.com**

СКОЩУК ВАЛЕНТИН КОСТЯНТИНОВИЧ – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: skoschuk999@gmail.com**

O.V. OSADCHUK, Ia.O. OSADCHUK, V.I. PETRENKO, V.K. SKOSCHUK

DEVELOPMENT OF A DETERMINATIVE CHAOS GENERATOR BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE RESISTANCE

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine