

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/12>**Осадчук О.В.**

Вінницький національний технічний університет

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

Петренко В.І.

Вінницький національний технічний університет

Скощук В.К.

Вінницький національний технічний університет

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

У роботі запропоновано та досліджено нове схемотехнічне рішення генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. 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. Методи зв'язку на основі хаосу пропонують переконливе рішення для безпечної передачі даних, особливо в сенсорних мережах Інтернету речей, де пристрої мають обмежені обчислювальні та енергетичні ресурси. У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в напівпровідниковому генераторі на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності колектору біполярного транзистора та струм двозатворного польового транзистора з індукованим каналом, а третя це струм індуктивності. 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 (15,36...19,82 нс).

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

Постановка проблеми. Зростаюче розширення систем і мереж Інтернету речей (IoT) трансформує традиційні середовища на розумні екосистеми в сучасному інформаційному світі [1, 2]. Такі системи включають дуже велику кількість сенсорів та перетворювачів вимірювальної інформації, які безперервно збирають та передають конфіденційні інформаційні потоки даних через мережі, забезпечуючи

розширені функції в розумних містах, промисловій автоматизації, медицині та військовій техніці [3–5]. Однак суттєве розгортання пристроїв IoT створює суттєві проблеми безпеки передачі інформативних сигналів. Популярність пристроїв IoT підкреслює необхідність надійних методів та засобів безпеки захисту конфіденційних даних від несанкціонованого доступу [6, 7]. 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 [8–10]. У електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладах і системах передача даних вимагає безпечних методів захисту конфіденційної інформації від порушень. Типові підходи до безпеки передачі даних включають шифрування, туманні обчислення або програмно-визначені мережі (SDN), кожен з яких застосовується до певних рівнів архітектури електронно-комунікаційних та радіотехнічних систем та мереж [11, с. 191–229].

Шифрування є одним із найпоширеніших методів, який застосовується переважно на мережевому та прикладному рівнях [11, с. 202–203]. Використання симетричних та асиметричних алгоритмів шифрування основним недоліком яких є необхідні великі обчислювальні витрати, що може бути проблематичним для малопотужних пристроїв з обмеженими ресурсами. У деяких випадках для балансування компромісу між безпекою та ефективністю використовуються легкі протоколи шифрування [12–15].

Туманні обчислення підвищують безпеку інфокомунікаційних систем і мереж, забезпечуючи обробку даних у режимі реального часу ближче до межі мережі, зменшуючи затримку та дозволяючи шифрування, фільтрацію даних та виявлення загроз перед пересиланням пакетів даних на сервери [13, 14]. Цей підхід покращує безпеку передачі даних, особливо в середовищах, що потребують швидкого прийняття рішень; однак він також створює складнощі в управлінні розподіленими ресурсами та забезпеченні безпеки на кількох межових пристроях [4, 5, 6]. Однак, таке централізоване керування також створює можливість відмови, так, якщо центральний контролер буде зламано, то безпека всієї мережі може опинитися під загрозою [12–15].

Використовуючи випадковість та фізичні властивості каналу передачі, такі як інформація про стан каналу, безпека фізичного рівня підвищує загальну безпеку, не покладаючись на ресурсоемні криптографічні операції, що робить її особливо придатною для електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладів і систем з обмеженою обчислювальною потужністю. Такі методи, як штучне введення шуму та радіочастотне зчитування відбитків пальців, ще більше посилюють безпеку,

перешкоджаючи підслуховуванню та автентифікації пристроїв на основі унікальних характеристик обладнання [13–16].

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 переконливе рішення для безпечної передачі даних, особливо в сенсорних мережах Інтернету речей, де пристрої мають обмежені обчислювальні та енергетичні ресурси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

На відміну від традиційних методів безпеки на основі шифрування, системи зв'язку на основі хаосу спираються на прості аналогові генератори хаосу, що робить їх добре придатними для енергоефективних та легких реалізацій. Ці системи забезпечують безпечну передачу від малопотужних сенсорів до більших мережевих вузлів без необхідності складних операцій, вирішуючи ключові проблеми в середовищах електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладів і систем з обмеженими ресурсами [11–15]. Такі системи генерують хаотичні форми хвиль, що характеризуються високою чутливістю до початкових умов та шумоподібними формами хвиль, що робить їх ідеальними для кодування конфіденційної інформації. У таких реалізаціях передавач і приймач повинні досягти точної синхронізації для декодування переданих даних, забезпечуючи додатковий рівень безпеки. Будь-яке порушення синхронізації робить перехоплений сигнал нечитабельним, що значно ускладнює несанкціонований доступ [17, 18].

Хаотичні сигнали демонструють детерміновану аперіодичну поведінку, чутливість до початкових умов та широкий спектр, що робить їх дуже привабливими для комунікаційних застосувань та покращених систем безпеки [19, 20]. Хаотичні сигнали виникають, коли нелінійні осцилятори налаштовані на роботу в певних умовах, причому точно налаштовані номінали компонентів змушують систему переходити в хаотичну область [20]. Іншим важливим питанням застосування хаотичних сигналів у реальних застосуваннях є синхронізація, яка є процесом досягнення збігу хаотичних сигналів на стороні передавача та приймача для надійної та безпечної передачі даних [21]. Осцилятори хаосу являють собою нелінійну динамічну систему, яка генерує хаотичні сигнали, що відрізняються чутливістю до початкових умов та шумоподібними формами хвиль [22].

Ці осцилятори є критично важливими в захищених системах зв'язку, оскільки їхня хаотична природа використовується для забезпечення безпеки фізичного рівня в електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладах і системах.

Постановка завдання. Метою роботи є: розробка та дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якому втрати енергії в коливальній системі компенсуються енергією диференційного від'ємного опору. Для досягнення поставленої мети у даній роботі потрібно розв'язати такі задачі:

1) провести аналіз літературних джерел та обґрунтувати використання транзисторних структур з диференціальним від'ємним опором для побудови генератора детермінованого хаосу;

2) розробити математичну модель генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, яка реалізує залежність частоти генерації від зміни напруги живлення та напруги керування з врахуванням основних параметрів всіх елементів генератора детермінованого хаосу;

3) провести експериментальні дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором;

4) зробити висновки з проведених досліджень.

Виклад основного матеріалу. 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 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 електронно-комунікаційних та радіотехнічних пристроїв та систем, доцільно використовувати частотний метод перетворення інформаційного сигналу, який дозволяє підвищити вихідну потужність генератора хаосу, а також розширити частотний діапазон генерованого хаотичного сигналу. 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 [23–27], які реалізують частотний принцип перетворення інформативного сигналу. Принципово автогенераторні транзисторні структури з від'ємним диференціальним опором представляють собою транзисторний аналог негatrona, вольт-амперна характеристика яких має спадаючу ділянку, що відповідає від'ємному диференціальному опору. Даний від'ємний опір забезпечується внутрішнім зворотним зв'язком транзисторної структури і слугує компенсацією втрат енергії в коливальному контурі. Імпеданс такої транзисторної структури, в залежності від вигляду його вольт-амперної характеристики, носить ємнісний або індуктивний характер, а його величина залежить від напруги живлення та керування. При з'єднанні такої транзисторної структури з індуктивністю утворюється резонансний коливальний контур.

У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в напівпровідниковому генераторі на основі біполярно-польової 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 колектору біполярного транзистора VT1 та стоку двозатворного польового транзистора VT2 з індукованим каналом, а третя це струм індуктивності L1.

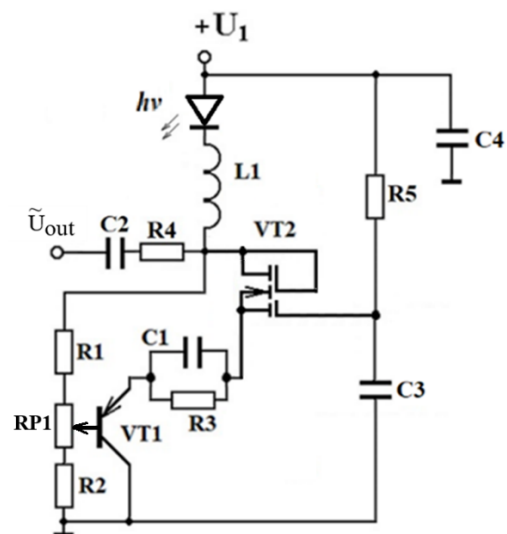
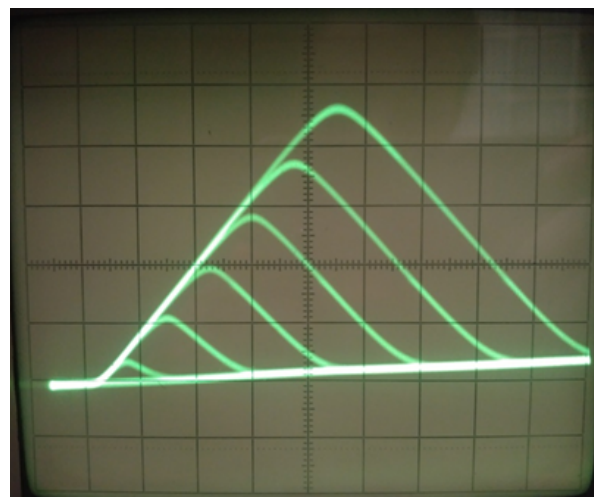


Рис. 1. Електрична схема генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури

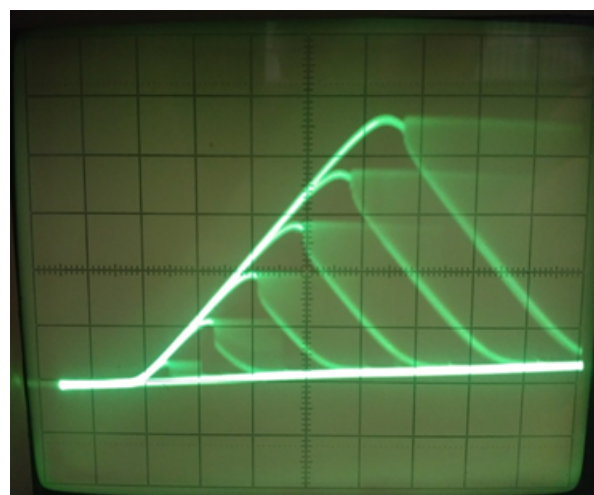
Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Для зміни динаміки хаотичних коливань, а також розширення фазового простору, додано послідовний ланцюг з резистора R5 та ємності C3, до індуктивної вітки базової схеми генератора на основі біполярно-польової 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 зі стоку двозатворного польового транзистора з індуктованим каналом 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 біполярно-польової транзисторної структури. Застосування світлодіоду 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 електронно-комунікаційних та радіотехнічних пристроїв та систем. Сімейство експериментальних статичних та динамічних вольт-амперних характеристик генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором подано на рис. 2.

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.



а)



б)

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

Для побудови математичної моделі генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури застосовано метод змінних стану, який дозволяє визначити значення напруг і струмів елементів кола в кожен 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 (її різновиду – методу контурних струмів). Отриману систему рівнянь використано для аналізу схеми методом змінних стану.

Хаотичну поведінку генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової

транзисторної структури можна математично охарактеризувати набором диференціальних рівнянь, заснованих на його схемі.

$$\begin{cases} C_d \frac{dU_{C_d}(t)}{dt} = \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{SD}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_l}, \\ C_c \frac{dU_{C_c}(t)}{dt} = \frac{U_{C_e}(t) - U_{C_{SD}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_l} + I_{bt} - I_{dr}, \\ C_e \frac{dU_{C_e}(t)}{dt} = A_1 + I_{bt} - I_{dr}, \\ C_s \frac{dU_{C_s}(t)}{dt} = -I_{pt} - \frac{U_{C_{SD}}(t)}{R_{ds}} + A_3, \\ L \frac{di_L(t)}{dt} = U_2 - i_L(t) \cdot R_4 - \frac{U_{C_e}(t) + U_{C_c}(t) + U_{C_s}(t)}{R_e + R_s}, \\ C_{SD}(t) \frac{dU_{C_{SD}}(t)}{dt} = \frac{U_{C_d}(t)}{R_d} + I_{pt} - \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{SD}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_l} + \frac{U_{C_{SD}}(t)}{R_{ds}}. \end{cases} \quad (1)$$

де L – індуктивність коливального контуру; R_{VD} – внутрішній опір світловипромінюючого діода; R_l , R_2 і R_3 – навантажувальні опори переходів стік–витік і база–колектор біполярного транзистора; R_{ds} – об’ємний опір каналу двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; R_d – об’ємний опір стоку двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; R_s – об’ємний опір витоку двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; R_e – об’ємний опір емітера біполярного транзистора; R_c – об’ємний опір колектора біполярного транзистора; R_b – об’ємний опір бази біполярного транзистора; C_e , C_c – ємності емітерного і колекторного переходів біполярного транзистора; C_s , C_d – ємності затвор–витік та затвор–стік двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; C_{SD} – ємність каналу двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; I_p , I_r – прямий і зворотній струм біполярного транзистора; I_{dr} , I_{df} – струми внутрішніх переходів база–колектор та база–емітер біполярного транзистора; I_{pt} – струм каналу двозатворного польового транзистора з індукованим каналом; U_1 – джерело живлення.

З огляду на те, що система рівнянь (1) містить в собі доданки, які описують нелінійні елементи (джерела струму), то система є нелінійною. Нелінійні елементи схеми описують струми нелінійних внутрішніх джерел елементів схеми. Прямий і зворотний струми переходів біполярного транзистора описуються рівняннями (2) [28, с. 243–258]:

$$I_f = I_s \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T \cdot NF}} - 1 \right); \quad I_r = I_s \left(e^{\frac{U_{BK}}{U_T \cdot NR}} - 1 \right). \quad (2)$$

Струми внутрішніх переходів біполярного транзистора база–емітер і база–колектор описуються рівняннями (3):

$$I_{DF} = \frac{I_f}{BF}; \quad I_{DR} = \frac{I_r}{BR}, \quad (3)$$

де BF , BR – максимальні коефіцієнти передачі струму за схемою ввімкнення спільний емітер.

Динамічна модель генератора детермінованого хаосу (система рівнянь (1)) 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 здійснено комп’ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі. На рис.3 представлено промодельований вихідний сигнал генератора детермінованого хаосу.

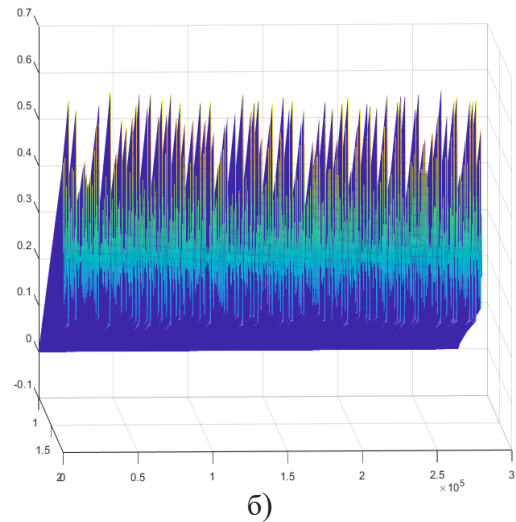
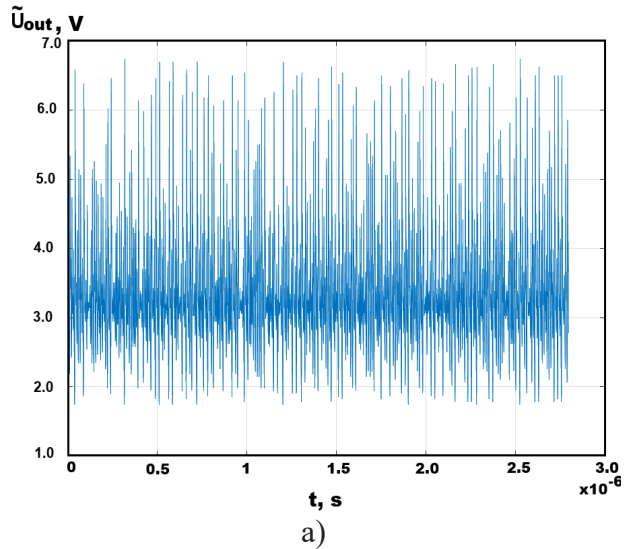


Рис. 3. Промодельований вихідний сигнал генератора детермінованого хаосу а) 2D; б) 3D

За допомогою Signal Processing Toolbox проведено спектральний аналіз розробленого генератора детермінованого хаоса, 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 хаоса на основі біполярно-польової транзисторної структури. Обчислені спектри потужності нерівномірно дискретизованих сигналів представлені на рис. 3. Промодельована подібність сигналу у частотній області, оцінюючи їх спектральну когерентність, що дозволило візуалізувати та порівняти часово-частотний склад нестаціонарних сигналів. Отримано точні спектральні оцінки за допомогою перепризначення та синхронізаційного стискання Фур'є. На рис. 4 представлені крос-спектрограми, розподілу Вігнера-Вілля та спектри персистенції. Оцінено спектральну потужність в часово-частотному представленні сигналу (рис. 5), миттєву частоту, миттєву ширину смуги пропускання (рис. 6), спектральний ексцес та спектральну ентропію.

Фундаментальна характеристика динамічного хаотичного сигналу, а саме подібність до розширеного спектру, має кілька корисних властивостей для електронно-комунікаційних та радіотехнічних систем [29]. 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 [29, 30]. 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 [29]. 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

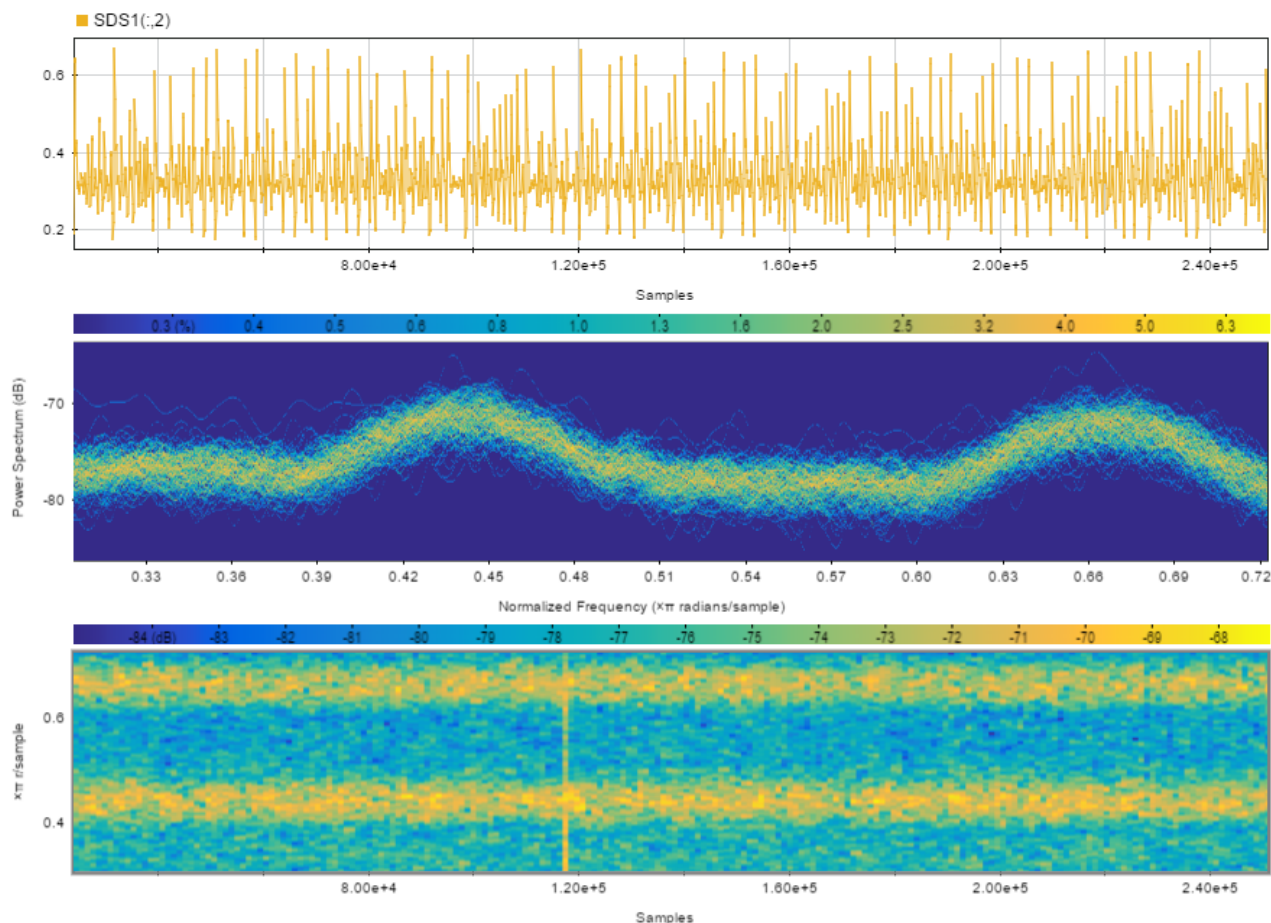


Рис. 4. Крос-спектрограми розподілу Вігнера-Вілля та спектри персистенції

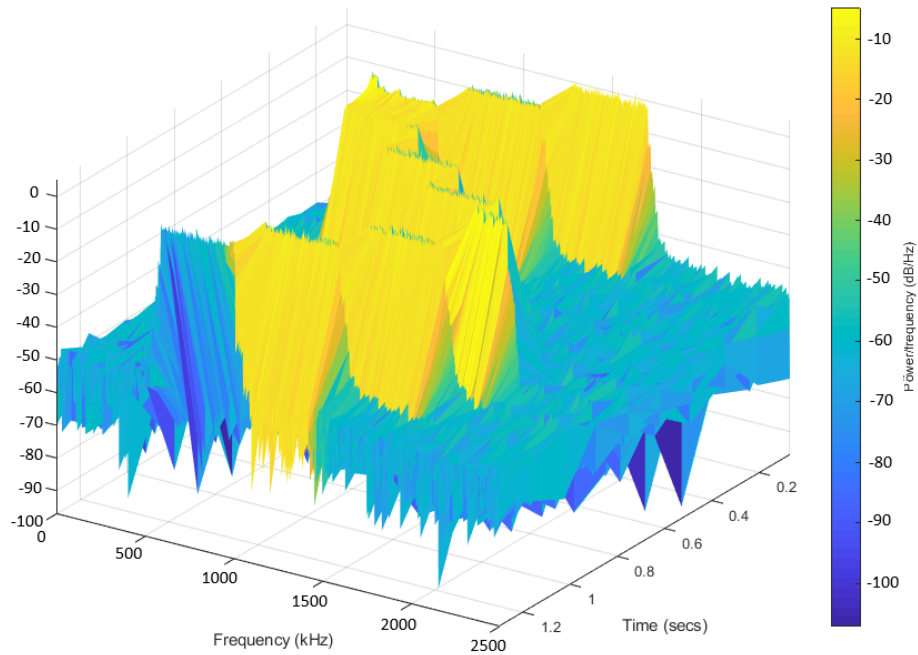


Рис. 5. 3D спектральна потужність в часово-частотному представленні сигналу

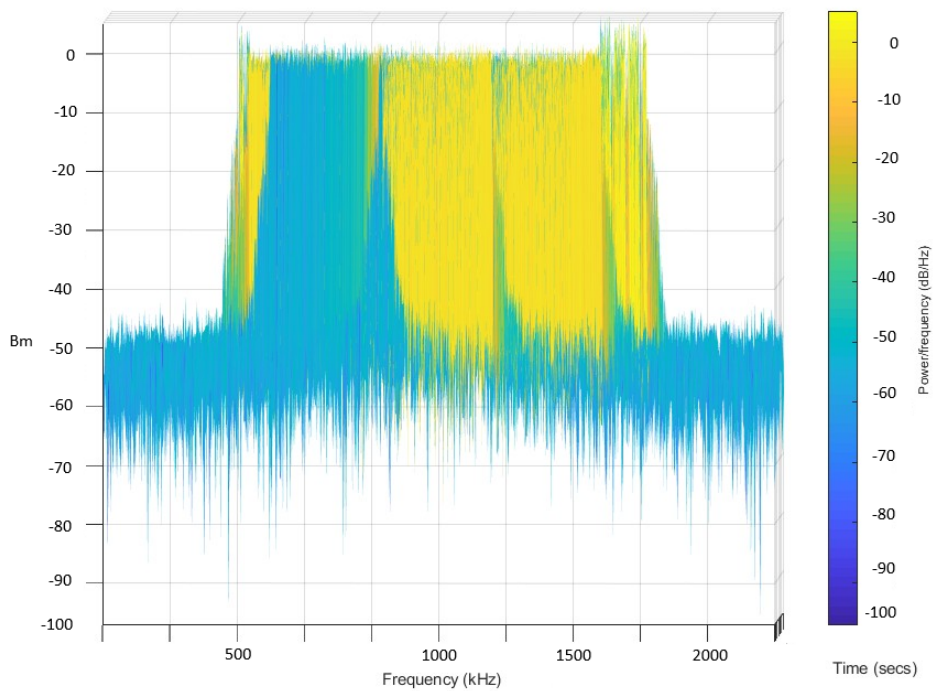


Рис. 6. Миттєва ширина смуги пропускання в часово-частотному представленні сигналу

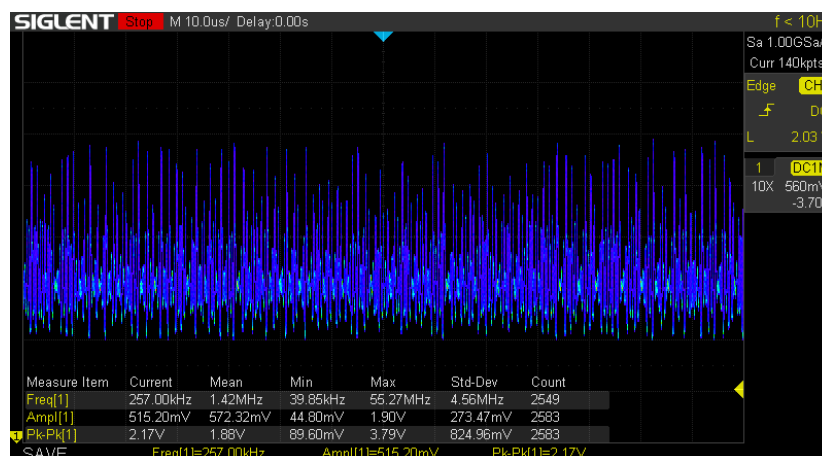
експериментальні дослідження спектрів вихідного сигналу генератора хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним опором.

Проведені експериментальні дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором показали, що дане схемотехнічне рішення дозволяє зменшити час встановлення стаціонарних коливань

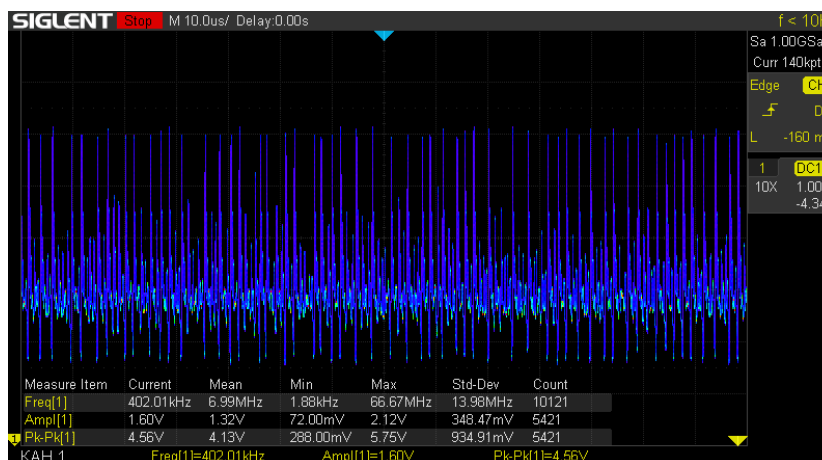
та розширити частотний діапазон хаотичних коливань. Дане схемотехнічне рішення має малий час встановлення стаціонарних коливань (15,36...19,82 нс). На рис. 7 представлено фазовий портрет генератора у площині динамічних змінних. На рис. 8 наведені експериментальні осцилограми хаотичних коливань генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури.



Рис. 7. Фазовий портрет генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури у площині динамічних змінних



а)



б)

Рис. 8. 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 схемотехнічне рішення генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності колектору біполярного транзистора та стоку двозатворного польового транзистора з індукованим каналом, а третя це струм індуктивності. 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 (15,36...19,82 нс).

Список літератури:

1. 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.
2. Sauter T., Treytl A. IoT-Enabled Sensors in Automation Systems and Their Security Challenges. *IEEE Sensors Lett.* 2023, 7, 1–4.
3. 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.
4. 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.
5. Capligins F., Litvinenko A., Kolosovs D. FPGA Implementation and Study of Antipodal Chaos Shift Keying Communication System. In *Proceedings of the 2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*, Riga, Latvia, 7–8 October 2021.
6. 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.
7. 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.
8. Michaels A.J. A maximal entropy digital chaotic circuit. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS)*, Rio de Janeiro, Brazil, 15–18 May 2011; IEEE: Piscataway NJ, USA, 2011; P. 717–720.
9. 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.
10. Ludovico Minati. Atypical transistor-based chaotic oscillators: Design, realization, and diversity / Ludovico Minati, Mattia Frasca, Paweł Oświecimka, Luca Faes, Stanisław Drożdż. *CHAOS*. 017. Vol. 27, 073113 (2017). P. 073113-1 – 073113-13.
11. Saber A. Security Analysis of Chaos Based Communication Systems; Carleton University: Ottawa, ON, Canada, 2007.
12. 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.
13. Rahman Z.-A.S.A., Jasim B.H., Al-Yasir Y.I.A., Abd-Alhameed R.A. Efficient Colour Image Encryption Algorithm Using a New Fractional-Order Memcapacitive Hyperchaotic System. *Electronics* 2022, 11, 1505.
14. Petrzela J., Chaotic States of Transistor-Based Tuned-Collector Oscillator. *Mathematics* 2023, 11, 2213.
15. Petrzela J., Polak L. Minimal realizations of autonomous chaotic oscillators based on trans-immittance filters. *IEEE Access* 2019, 7, 17561–17577.
16. 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.
17. Haniyas M. P. Chaotic Behavior of Transistor Circuits / M. P. Haniyas, H. E. Nistazakis, G. S. Tombras // Chapter 4 in *Understanding Complex Systems*, July 2012. P. 59–91.
18. Babajans R., Cirjulina D., Capligins F., Kolosovs D., Grizans J., Litvinenko A. Performance Analysis of Vilnius Chaos Oscillator-Based Digital Data Transmission Systems for IoT. *Electronics*. 2023; 12 (3): 709.

19. Tjukovs S., Eidaks J., Pikulins D. Experimental Verification of Wireless Power Transfer Ability to Sustain the Operation of LoRaWAN Based Wireless Sensor Node. In *Proceedings of the IEEE 2018 Advances in Wireless and Optical Communications* (RTUWO 2018), Latvia, Riga, 15–16 November 2018.
20. Kekha Javan, A.A.; Shoeibi, A.; Zare, A.; Hosseini Izadi, N.; Jafari, M.; Alizadehsani, R.; Moridian, P.; Mosavi, A.; Acharya, U.R.; Nahavandi, S. Design of adaptive-robust controller for multi-state synchronization of chaotic systems with unknown and time-varying delays and its application in secure communication. *Sensors* 2021, 21, 254.
21. Cirjulina D., Pikulins D., Babajans R., Zeltins M., Kolosovs D., Litvinenko A. Experimental Study on FM-CSK Communication System for WSN. *Electronics*. 2022; 11 (10) : 1517.
22. Capligns F., Litvinenko A., Kolosovs D. FPGA Implementation and Study of Antipodal Chaos Shift Keying Communication System. In *Proceedings of the 2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications* (MTTW), Riga, Latvia, 7–8 October 2021.
23. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Piotr Kisala, 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, 2019. P. 1–12.
24. 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, 2021. 04001. 6 p.
25. 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) P. 277–284.
26. 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, P. 442–446.
27. 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, P. 229–261.
28. Sze S.M. and Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices* Wiley-Interscience, USA. 2007.
29. 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).
30. Kaushal H., Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 19 (1). 2017. P. 57–96.

Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Petrenko V.I., Skoshchuk V.K. RESEARCH OF A DETERMINATIVE CHAOS GENERATOR BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE

The paper proposes and investigates a new circuit solution for a deterministic chaos generator based on a bipolar field-effect transistor structure with negative differential resistance. 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. Chaos-based communication methods offer a compelling solution for secure data transmission, especially in sensor networks of the Internet of Things, where devices have limited computing and energy resources. The paper considers the possibility of obtaining a chaotic mode in a semiconductor generator based on a bipolar field-effect transistor structure with negative differential resistance. This chaos generator system has three dynamic variables: the voltage at the equivalent capacitance of the collector of a bipolar transistor and the drain of a two-gate field-effect transistor with an induced channel, and the third is the inductance current. The dynamic processes of deterministic chaos are determined by the reactive properties of a transistor structure with negative differential resistance. A mathematical model of a 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 has been carried out. Compared to analogues, the proposed and investigated deterministic chaos generator has improved load capacity and higher speed, has a short time for establishing stationary oscillations (15.36... 19.82 ns).

Key words: oscillator, deterministic chaos, transistor structure, negative differential resistance, deterministic chaos generator.