
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, К.В. ШИКУН

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСА НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ

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

Анотація. У роботі проведено експериментальне дослідження нового схематехнічного 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. Були проведені експериментальні дослідження від низьких частот до мікрохвильових частот для визначення оптимальних робочих частот для різних задач використання розробленого пристрою. Отримано ВАХ, діаграму Сміта параметру S_{11} , імпеданс S_{11} , активну та реактивну складові повного опору, еквівалентну ємність та індуктивність, SWR генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц. А також отримано експериментальні осцилограми розробленого генератора хаосу. 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 work presents an experimental study of a new circuit solution for a deterministic chaos 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. Experimental studies were conducted from low frequencies to microwave frequencies to determine the optimal operating frequencies for various tasks of using the developed device. The I-V characteristic, the Smith chart of the S_{11} parameter, the S_{11} impedance, the active and reactive components of the impedance, the equivalent capacitance and inductance, and the SWR of the chaos generator based on two bipolar transistors in the frequency range from 15 kHz to 1 GHz were obtained. And also experimental oscillograms of the developed chaos generator were obtained. In comparison with analogues, the proposed and investigated deterministic chaos generator has improved loading capacity and higher speed, has a short time of establishment of stationary oscillations.

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

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-235-246

ВСТУП

Інтернет речей (IoT) – це постійно зростаюча кількість різноманітних пристроїв з доступом до Інтернету для засобів зв'язку, збору даних, передачі даних та моніторингу інформаційно-вимірювальних, комп'ютерних систем загального та спеціального призначення.

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

Пристрої, інтегровані з IoT, не завжди є носимі пристрої та мобільні телефони, але також включають транспортні засоби, системи моніторингу фізичних величин, системи безпеки, військової техніки, пристрої моніторингу тварин і сільськогосподарських систем [1–3]. Ці пристрої постійно розвиваються, з вимогами щодо зниження енергоспоживання, зменшення форм-факторів, покращення безпеки та збільшення пропускну здатності, з унікальними вимогами залежно від застосування пристрою [1, 2].

Однією з головних проблем для пристроїв Інтернету речей є високопродуктивна безпека, яка потенційно може бути використана для таких застосувань, як шифрування зображень та відео, зберігаючи при цьому низький профіль енергоспоживання. Задоволення цієї потреби є нетривіальним, оскільки необхідно шукати компроміси між управлінням живленням та безпекою. Часто, під час підвищення безпеки системи виникає вроджена потреба у більшій потужності. Це складне рішення для інженерів пристроїв Інтернету речей, і часто воно залежить від конкретного застосування. Задоволення цих потреб у конфіденційності пов'язане з кількома перешкодами.

Для цього можна використовувати потокові шифри на основі хаосу, які є дуже захищеними від криптографічних атак, оскільки хаотичні сигнали є внутрішньо захищеними та мають високу нелінійність [3]. Безпека поточкового шифру значною мірою залежить від генератора псевдовипадкових чисел (ГВПЧ), який діє як основний компонент системи.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

В останні роки спостерігається розвиток різноманітних криптосистем, що використовують хаотичні системи та карти, зокрема для генерації псевдовипадкових чисел та шифрування. Деякі з них мають проблеми з безпекою або низькою обчислювальною продуктивністю [4–6]. Більше того, деякі з цих криптосистем не дуже добре підходять для використання на інтелектуальних пристроях з обмеженими ресурсами, такими як низький обсяг пам'яті, обмежені обчислювальні можливості та проблеми енергоефективності [7, 8]. Пристрої, що використовуються в Інтернеті речей, мають низьке енергоспоживання та обмежені ресурси, тому для цих пристроїв апаратна реалізація криптосистем є більш доцільною, ніж програмна.

Хаотичні системи характеризуються чутливістю до початкових умов, широким спектром та шумоподібними формами хвиль. 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. Осцилятори хаосу – це малопотужні аналогові схеми, які демонструють хаотичну поведінку та спеціально розроблені для роботи як джерело хаотичних сигналів. Першими широко вивченими осциляторами хаосу були осцилятор хаосу Чуа [7], осцилятор хаосу Колпіттса [8], осцилятор хаосу Вільнюса [9], RC-осцилятор хаосу [10] та мемристорний осцилятор хаосу [11]. Протягом багатьох років деякі автори внесли модифікації до оригінальних схем [12–15], а також були запропоновані інші схеми [16–18]. Хаотичні осцилятори складаються з індукторів, конденсаторів, резисторів, діодів, транзисторів та операційних підсилювачів. Хаотичну поведінку також можна спостерігати в інших схемах за певних умов, таких як перетворювачі постійного струму, як показано в [19].

Щодо дискретних хаотичних джерел, найпоширенішим підходом є хаотичні відображення – дискретні нелінійні функції. Хаотичні відображення зазвичай використовуються для шифрування завдяки своїй прямій, дискретній природі [20, 21]. Іншим способом реалізації дискретного хаосу є отримання числових розв'язків нелінійних рівнянь схем. Хоча це новий підхід, він набув популярності в останні роки [22] завдяки кращому контролю над початковими умовами та зменшенню неточності аналогових компонентів. Дискретні хаотичні джерела також набули популярності завдяки можливості їх реалізації в програмованих користувачем вентильних матрицях (FPGA), як показано в [23].

Метою роботи є експериментальне 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.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Особливістю генерування сигналів детермінованого хаосу аналоговими пристроями є використання їхніх нелінійних статичних або динамічних характеристик. Простота схемотехнічних рішень транзисторних генераторів детермінованого хаосу є необхідною умовою для зменшення нестабільностей

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

в роботі телекомунікаційних та радіотехнічних приладів і систем загального та спеціального призначення.

На основі аналізу вибору оптимального варіанта схемного рішення транзисторного генератора детермінованого хаосу, доцільно використовувати частотний метод перетворення інформаційного сигналу, який дозволяє підвищити вихідну потужність генератора хаосу, а також розширити частотний діапазон генерованого хаотичного сигналу [24, 25]. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що в якості схем генераторів детермінованого хаосу доцільно використовувати схемні рішення генераторних схем на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором [26 – 29], які реалізують частотний принцип перетворення інформативного сигналу. Повний опір такої транзисторної структури, в залежності від виду його ВАХ, має ємнісний або індуктивний характер, а його величина залежить від напруги живлення та керування.

У роботі представлені експериментальні дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, електрична схема якого представлена на рис. 1. 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 змищенні [14].

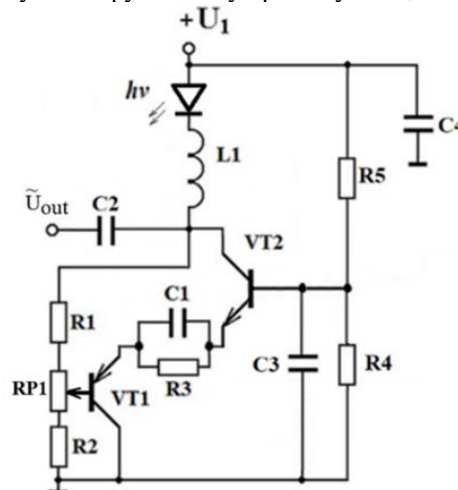


Рисунок 1 – Схема генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором

Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором.

Для опису динамічних процесів у схемі генератора детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором доцільно використати математичну модель [14], яку нормовано у часі

$$T = \omega_0 t \quad (1)$$

та нормованих змінних має вигляд

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = mx_1 + x_2 - x_1 x_3 - dG(x_1); \\ \dot{x}_2 = -x_1; \\ \dot{x}_3 = -gx_3 + gI(x_1)F(x_1), \end{cases} \quad (2)$$

де $G(x_1)$ – нормована функція апроксимації робочої вітки з сімейства ВАХ біполярної транзисторної структури; $F(x_1)$ – нормована функція апроксимації статичної ВАХ напівпровідникового діода; ω_0 – частота стаціонарних періодичних коливань генератора; $I(x_1)$ – функція, яка описує умову пропускання струму крізь діод у прямому напрямку; g – параметр автоколивальної системи, який пропорційний

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

відносному часу релаксації інерційного елемента ($g = 0,1 \dots 0,9$); m – параметр автоколивальної системи, який пропорційний різниці внесеної в коливальний контур та розсіяної енергії ($m = 0,6 \dots 1,2$); d – малий параметр, який відповідає ступеню впливу нелінійності крутизни ВАХ транзисторної структури ($d = 0,1 \dots 0,2$) [14].

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. 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 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. У діапазоні від 15 кГц до 0,75 ГГц, працюючи безпосередньо з FPGA отримуємо високу точність перетворення і синхронізації з паралельними потоками даних від кількох пристроїв приймання і передавання. Нижче наведені експериментальні дані за дослідженням генератора детермінованого хаосу. Розроблено експериментальний зразок генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів BFR92 і BFT93, що утворюють напівпровідникову структуру з від'ємним диференціальним опором. У середовищі Scilab 6.11 на основі експериментальних даних побудовано вольт-амперні характеристики транзисторної структури на основі біполярних транзисторів BFR92 та BFT93, які наведені на рис.2.

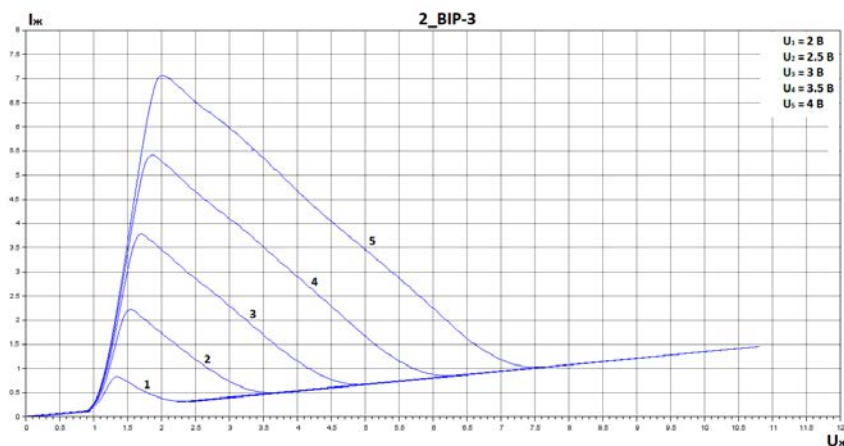


Рисунок 2 – Вольт-амперна характеристика транзисторної структури на основі біполярних транзисторів BFT93 і BFR92

Сімейство вольт-амперних характеристик транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором отримано шляхом заміни дільника напруги R1, R2 додатковим джерелом керуючої напруги V2. Експериментальні дослідження проводили з керуючими напругами в діапазоні від 2,0 В до 4,0 В з кроком 0,5 В.

На рис. 3 показана діаграма Сміта параметру S11 досліджуваної структури в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц. На рис. 4 зображено імпеданс S11 досліджуваної структури. На рис. 5 показано зміну параметру S11 (активна та реактивна складова) в тому ж діапазоні частот, а на рис. 6 зміна активної а на рис.7 реактивної складових імпедансу генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц.

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

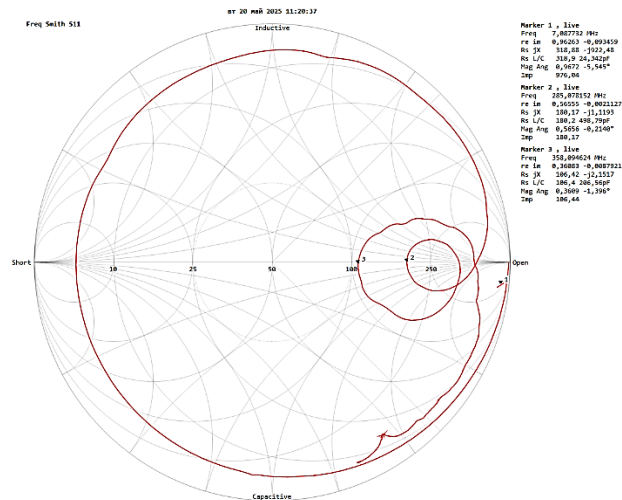


Рисунок 3 – Діаграма Сміта параметру S11 генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц

Як зазначалося вище, генератор хаосу на основі двох біполярних транзисторів для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем і мереж загального та спеціального призначення на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором і зміна імпедансу транзисторної структури робить внесок у налаштування частоти від зміни напруги керування. Тому дослідження імпедансу (як активної, так і реактивної складових імпедансу в широкому діапазоні частот) цієї структури є невід'ємною частиною розробки пристрою. Експериментальні дослідження параметрів S11 проводяться в активному режимі з живленням через модуль живлення RF+DC. Він складається з високочастотних котушок індуктивності та конденсаторів із над широкою смугою, майже ідеальною, та без резонансної точки. Високочастотна індуктивність ізолює потік інформації змінного струму, щоб запобігти витокі високочастотних сигналів у блок живлення.

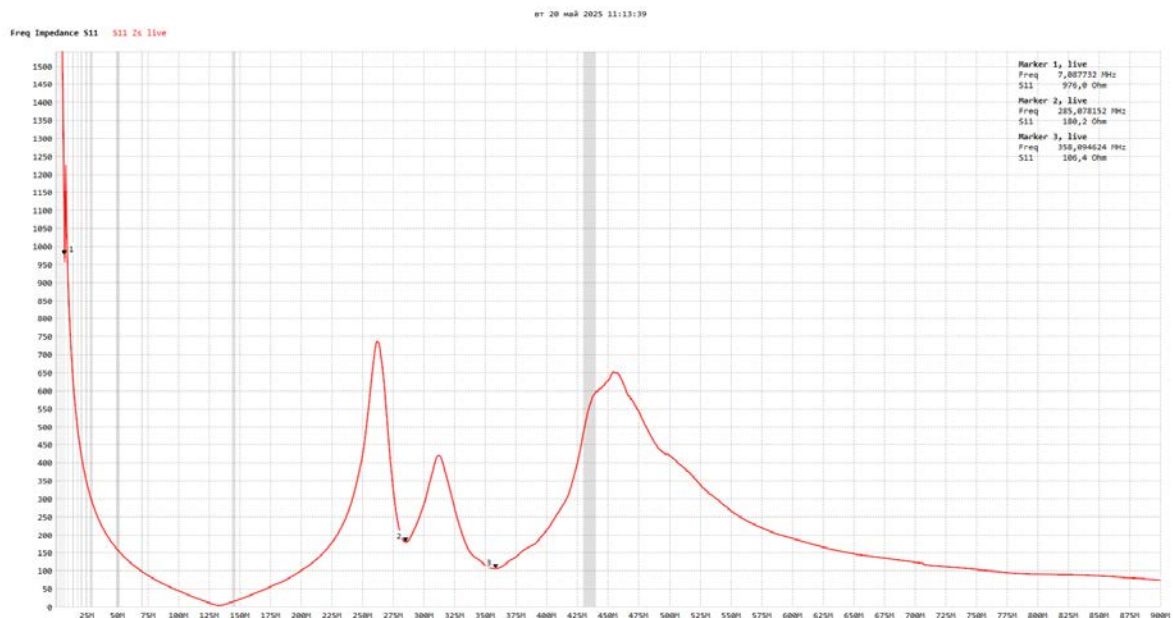


Рисунок 4 – Зміна імпедансу S11 генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц

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

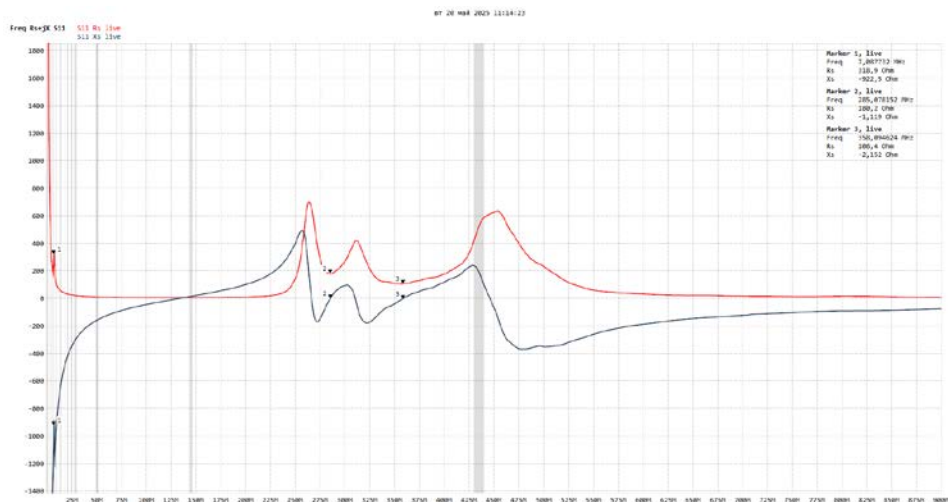


Рисунок 5 – Зміна параметру S11(активна та реактивна складова) генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторах в діапазоні частоти від 15 кГц до 1 ГГц

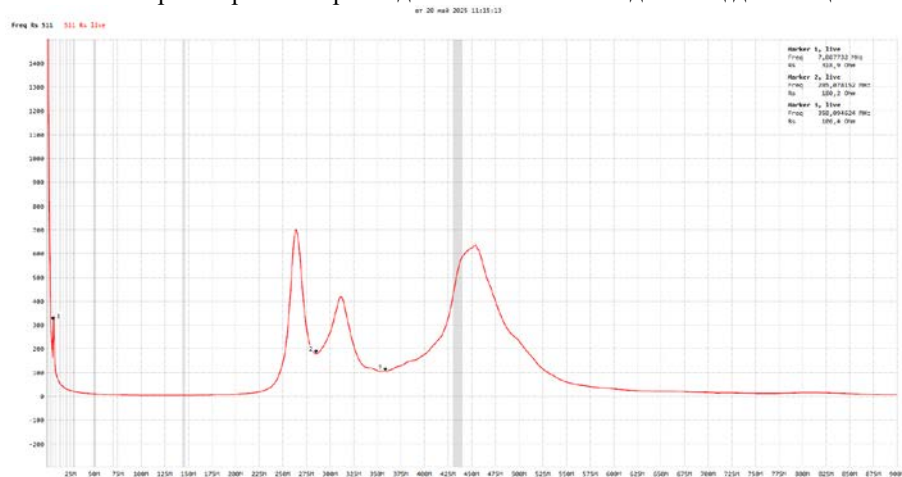


Рисунок 6 – Зміна активної складової імпедансу генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторах в діапазоні частоти від 15 кГц до 1 ГГц

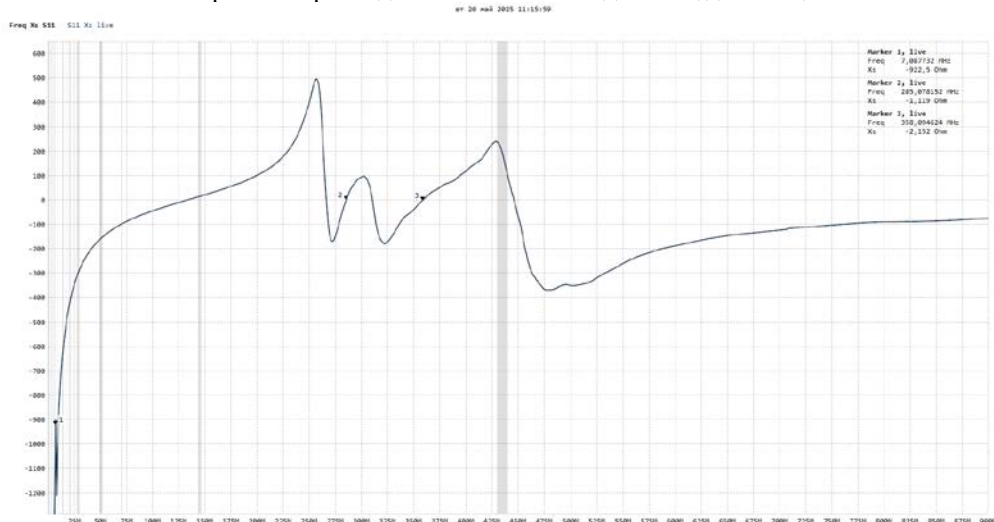


Рисунок 7 – Зміна реактивної складової імпедансу генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторах в діапазоні частоти від 15 кГц до 1 ГГц

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

Експериментальні залежності прохідної ємності автоколивального приладу подано на рис.8, а на рис.9 подано індуктивність досліджуваної структури в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц.



Рисунок 8 – Зміна прохідної ємності генератора хаосу в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц



Рисунок 9 – Зміна індуктивності генератора хаосу в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц

Експериментальна залежність добротності транзисторної структури наведено на рис. 10. Залежність SWR генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів наведена на рис.11.

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

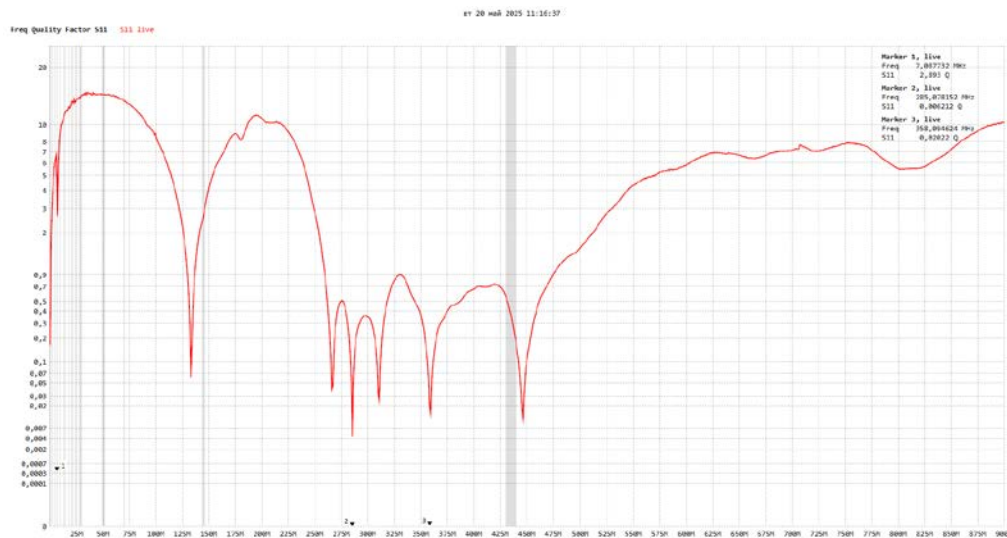


Рисунок 10 – Зміна добротності генератора хаосу в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц

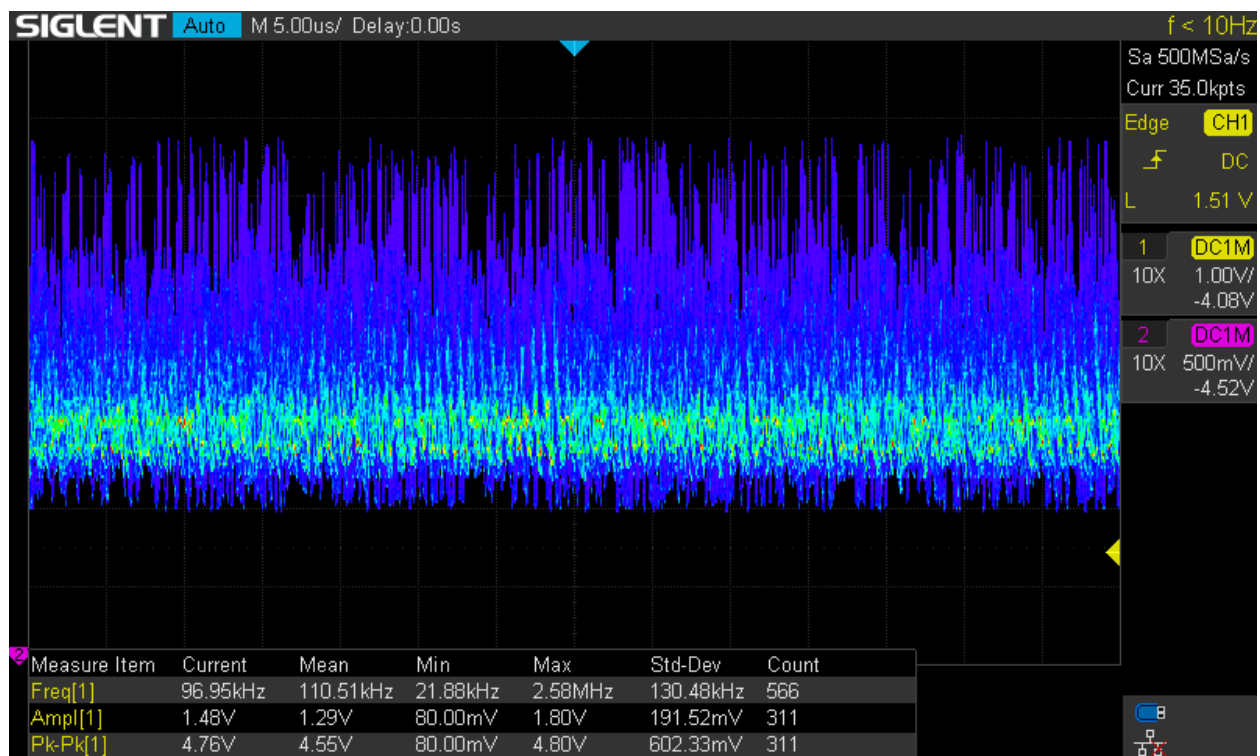


Рисунок 11 – Зміна SWR генератора хаосу в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц

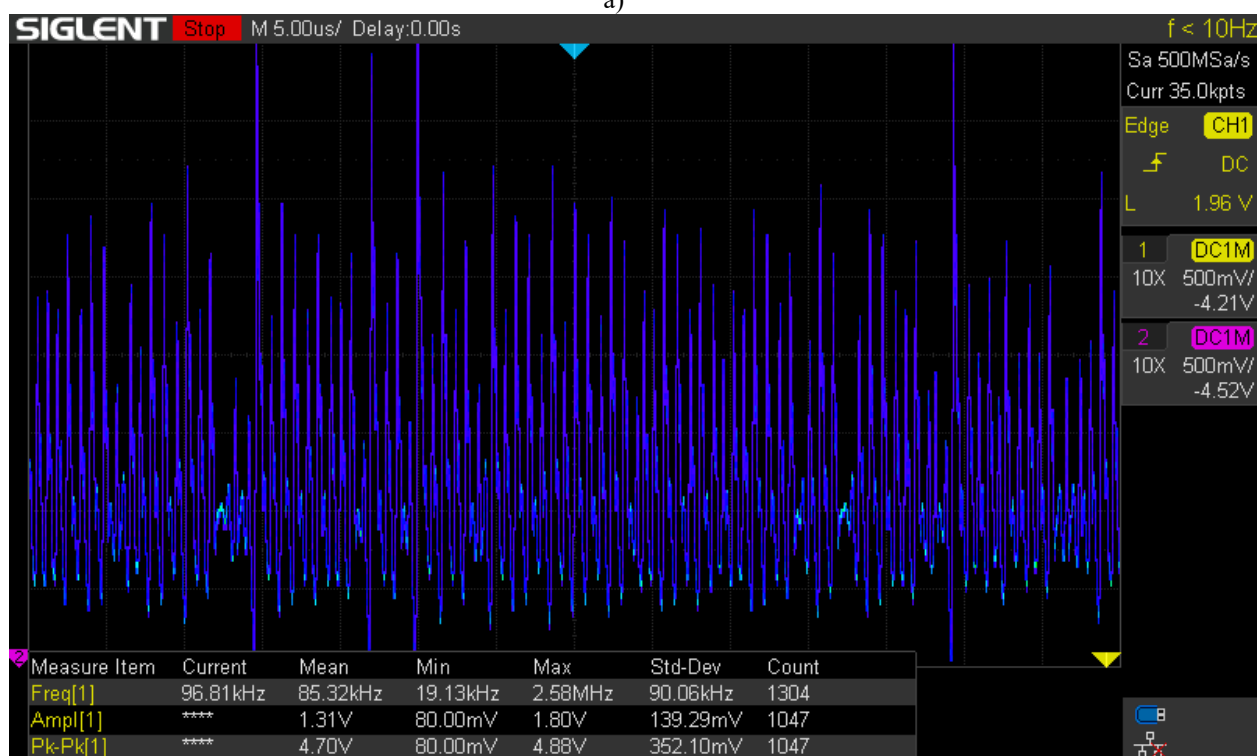
На рис.12 а, б представлені експериментальні осцилограми розробленого генератора хаосу при різних часових розгортках осцилографа. Частотний діапазон застосування генератора хаосу для передачі інформативного сигналу обрано від 2300 МГц до 2600 МГц це LTE-2600, Band 7, мобільний зв'язок та Wi-Fi діапазон частот застосовується для обладнання, що працює в частотному діапазоні від 2 ГГц до 3 ГГц (мобільний зв'язок, бездротовий інтернет, наземні термінали, системи Inmarsat, бездротова аудіо та відеоапаратура).

Експериментальні дослідження проведено за допомогою аналізатора радіочастотного спектру TinySA Ultra в програмі SpectroZir SA. На рис. 13 представлено радіочастотний спектр пристрою передачі сигналу з модуляцією генератором хаосу на біполярній транзисторній структурі з від'ємним диференціальним опором, частота несучої передачі складає 2425,0 МГц.

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



a)



б)

Рисунок 12 – Експериментальні осцилограми розробленого генератора хаосу при різних часових розгортках осцилографа

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



Рисунок 13 – Спектр вихідного сигналу пристрою передавання на основі генератора хаосу в діапазоні від 2,3 ГГц до 2,55 ГГц

ВИСНОВОК

У роботі проведено експериментальне дослідження нового схемотехнічного рішення генератору 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. Були проведені експериментальні дослідження від низьких частот до мікрохвильових частот для визначення оптимальних робочих частот для різних задач використання розробленого пристрою. Отримано ВАХ, діаграму Смита параметру S_{11} , імпеданс S_{11} , активну та реактивну складові повного опору, еквівалентну ємність та індуктивність, SWR генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц. А також отримано експериментальні осцилограми розробленого генератора хаосу. У порівнянні з аналогами запропонований та досліджений генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію має малий час встановлення стаціонарних коливань.

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. Dridi, F.; El Assad, S.; El Hadj Youssef, W.; Machhout, M.; Lozi, R. The Design and FPGA-Based Implementation of a Stream Cipher Based on a Secure Chaotic Generator. *Appl. Sci.* 2021, 11, 625.
4. Wang, X.Y.; Zhang, J.J.; Zhang, F.C.; Cao, G.H. New chaotical image encryption algorithm based on Fisher–Yates scrambling and DNA coding. *Chin. Phys. B* 2019, 28, 040504.
5. Belazi, A.; Abd El-Latif, A.A.; Belghith, S. A novel image encryption scheme based on substitution-permutation network and chaos. *Signal Process.* 2016, 128, 155–170.
6. Datcu, O.; Macovei, C.; Hobincu, R. Chaos based cryptographic pseudo-random number generator template with dynamic state change. *Appl. Sci.* 2020, 10, 451.

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

7. Thakor, V.A.; Razzaque, M.A.; Khandaker, M.R. Lightweight cryptography algorithms for resource-constrained IoT devices: A review, comparison and research opportunities. *IEEE Access* 2021, 9, 28177–28193.
8. 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.
9. Sulaiman, A.G. Overview of ZUC Algorithm and its Contributions on the Security Success and Vulnerabilities of 4G Mobile Communication. *Int. J. Comput. Appl.* 2017, 975, 8887.
10. Ming, T.; PingPan, C.; ZhenLong, Q. Differential Power Analysis on ZUC Algorithm. *Cryptol. Eprint Arch.* (2023).
11. Dridi, F.; El Assad, S.; El Hadj Youssef, W.; Machhout, M.; Lozi, R. The Design and FPGA-Based Implementation of a Stream Cipher Based on a Secure Chaotic Generator. *Appl. Sci.* 2021, 11, 625.
12. Pareek, N.K.; Patidar, V.; Sud, K.K. Image encryption using chaotic logistic map. *Image Vis. Comput.* 2006, 24, 926–934.
13. François, M.; Grosge, T.; Barchiesi, D.; Erra, R. Pseudo-random number generator based on mixing of three chaotic maps. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2014, 19, 887–895.
14. Semenov A. O., Osadchuk O. V. Deterministic chaos generator with inertial nonlinearity based on a bipolar transistor structure with negative resistance. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2017. No. 6. pp. 147–152.
15. 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.
16. 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.
17. 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*.
18. Petrzela J., Chaotic States of Transistor-Based Tuned-Collector Oscillator. *Mathematics* 2023, 11, 2213.
19. Wang, L.; Wang, C.; Zhang, H.; Ma, P.; Zhang, S. Estimation-Correction Modeling and Chaos Control of Fractional-Order Memristor Load Buck-Boost Converter. *Complex Syst. Model. Simul.* 2024, 4, 67–81
20. Zhang, C.; Zhang, S.; Liang, K.; Chen, Z. Double Image Encryption Algorithm Based on Parallel Compressed Sensing and Chaotic System. *IEEE Access* 2024, 12, 54745–54757.
21. Kumar Thukral, M. SCLLCM: A Robust One Dimensional Chaotic Map for Image Encryption Application. *In Proceedings of the 2024 Asia Pacific Conference on Innovation in Technology (APCIT), Mysore, India, 26–27 July 2024; pp. 1–5*.
22. Zhang, J.; Qi, L. Detection of Weak Signals Based on the Duffing Chaotic System and FPGA Implementation. *In Proceedings of the 2024 5th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT), Nanjing, China, 29–31 March 2024; pp. 2212–2218*.
23. 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.
24. Petrzela J., Chaotic States of Transistor-Based Tuned-Collector Oscillator. *Mathematics* 2023, 11, 2213.
25. Petrzela J., Polak L. Minimal realizations of autonomous chaotic oscillators based on trans-immittance filters. *IEEE Access* 2019, 7, 17561–17577.
26. 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.
27. 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.
28. 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*.

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

29. 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.

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](mailto: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](mailto: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](mailto:kaf.rt.vntu@gmail.com)

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

ШИКУН КОСТЯНТИН ВІТАЛІЙОВИЧ – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, [e-mail: shykumkv@gmail.com](mailto:shykumkv@gmail.com)

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

EXPERIMENTAL STUDY OF A DETERMINATIVE CHAOS GENERATOR BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine