

ОСАДЧУК Олександр

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>

e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

ОСАДЧУК Ярослав

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5472-0797>

e-mail: osadchuk.j93@gmail.com

СКОЩУК Валентин

Вінницький національний технічний університет

e-mail: skoschuk999@gmail.com

ПЕТРЕНКО Віталій

Вінницький національний технічний університет

ГЕНЕРАТОР ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНО-ПОЛЬОВОЇ 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, яка має малий час встановлення стаціонарних коливань (17,25...21,28 нс). Розроблено математичну модель генератора детермінованого хаосу у вигляді диференціальних рівнянь першого порядку на основі методу змінних стану, яка дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги 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.

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

OSADCHUK Oleksandr, OSADCHUK Iaroslav, SKOSHCHUK Valentyn, PETRENKO Vitaliy
Vinnytsia National Technical University

DETERMINATIVE CHAOS GENERATOR BASED ON BIPOLAR FIELD TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE

This paper proposes and comprehensively investigates an innovative circuit solution for the implementation of a deterministic chaos generator. The proposed system is based on a bipolar field-effect transistor (BFET) structure featuring negative differential resistance, which enables the generation of chaotic electrical oscillations with extremely short settling times, ranging from 17.25 to 21.28 nanoseconds. Such a short transition to stationary chaotic behavior makes the circuit particularly suitable for high-speed applications in electronics and communication systems.

To support theoretical analysis and practical design, a detailed mathematical model of the chaos generator has been developed using the state variable method. This model takes the form of a system of first-order differential equations and enables precise determination of the output signal frequency as a function of the applied control voltage. Furthermore, the model allows for tracking and analyzing the behavior of the main oscillator components at any location in the circuit and at any moment in time, offering a valuable tool for both theoretical insight and real-time control.

The MATLAB software package was employed to conduct an extensive computer-based study of the circuit's performance. These simulations examined key parameters and characteristics of the chaotic oscillations, including waveform behavior, spectral content, and system stability under various conditions. The results of the simulation confirmed the effectiveness and robustness of the proposed design in achieving deterministic chaos with well-defined controllability.

Compared to existing analog designs, the proposed deterministic chaos generator demonstrates enhanced load-driving capability and significantly higher operational speed, establishing it as a superior alternative for advanced applications. Potential use cases include secure communications, cryptographic systems, random number generation, and modeling of complex nonlinear phenomena in electronic systems.

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

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 04.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Зростаюче застосування інтелектуальних взаємопов'язаних пристроїв в Інтернеті речей (IoT) привело до трансформації різних секторів промисловості [1]. Основною мотивацією для цього розвитку є полегшення

контролю, збору та обробки інформаційних даних для промислових, аерокосмічних, військових, медичних, сільськогосподарських та багатьох інших застосувань, це також зумовлено досягненнями в технологіях стільникових мереж [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. Наприклад, несанкціонований віддалений доступ хакерів може призвести до витоку даних та компрометації інформації [3]. Крім того, шкідливе програмне забезпечення може потенційно стерти дані в численних системах, спричиняючи значні втрати. Персональні дані, включаючи конфіденційні зображення, повідомлення та відео, також знаходяться під загрозою остаточного видалення [4]. Ці нагальні проблеми підкреслюють критичну потребу в надійних алгоритмах шифрування, розроблених для підвищення безпеки та захисту персональних даних від несанкціонованого доступу та знищення.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

В останні десятиліття спостерігається зростаючий інтерес до вивчення динамічних систем, зокрема хаотичних систем. Хаотичні системи – це традиційні нелінійні динамічні системи, чутливі до початкових умов, явище, яке часто називають ефектом метелика [5]. Цей ефект означає, що коли дві ідентичні хаотичні системи починаються з майже однакових початкових умов, їхні траєкторії з часом експоненціально розходяться, що призводить до суттєво різних результатів [6-8]. Було розроблено різноманітні методи шифрування повідомлень та забезпечення безпечної передачі, проте застосування хаосу в шифруванні є відносно новою інновацією. Ключова відмінність полягає в їхніх операційних областях: криптографічні системи функціонують у скінченному полі, тоді як теорія хаосу застосовується до неперервних областей [9]. Незважаючи на цю розбіжність, обидві галузі демонструють помітні паралелі. Основні принципи теорії хаосу, такі як змішування, чутливість до початкових умов та залежність від параметрів, сильно відповідають криптографічним принципам. Хаотичні системи характеризуються чутливістю до початкових умов, широким спектром та шумоподібними формами хвиль [10-12]. 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].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

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.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Особливістю генерування сигналів детермінованого хаосу аналоговими пристроями є використання їхніх нелінійних статичних або динамічних характеристик. Простота схемних рішень генераторів детермінованого хаосу є необхідною умовою для зменшення нестабільностей в роботі електронних приладів, які зумовлені параметрами елементів, що входять в склад автогенераторів які призводить до переходу автоколивальної системи від хаотичних коливань до стохастичних [13, 14, 15]. У даній роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в автогенераторі на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Електрична схема генератора детермінованого хаосу подана на рис. 1. Дана схема являє собою інтегральну гібридну схему, що складається з біполярного транзистора VT1 і польового транзистора з індукованим каналом VT2. Автоколивальна система генератора детермінованого хаосу має три динамічні змінні, дві з яких це напруги на еквівалентних ємностях транзисторної структури, а третя це струм індуктивності L1.

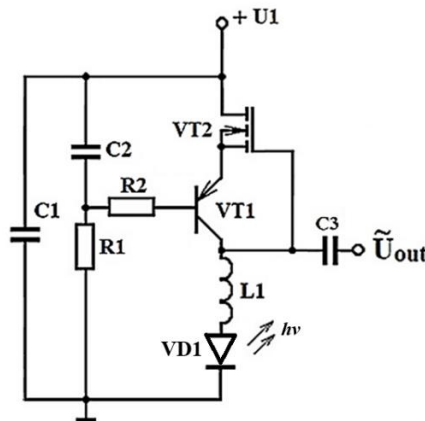


Рис.1. Електрична схема генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором

Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Для зміни динаміки хаотичних коливань та розширення робочого об'єму фазового простору додано ланцюг R1C2, до індуктивної вітки базової схеми генератора на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором додано коло з послідовно включеного світловипромінюючого діода. На електродах колектор-стік транзисторів VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова цього опору має від'ємне значення, а реактивна складова носить ємнісний характер [16-18]. Підключення пасивної індуктивності L1 до колектора біполярного транзистора VT1 створює коливальний контур генератора детермінованого хаосу, втрати енергії в якому компенсуються енергією диференціального від'ємного опору. За допомогою джерела постійної напруги U1 та резисторів R1, R2 встановлюється робоча точка генератора детермінованого хаосу на спадній ділянці вольт-амперної характеристики. Сімейство експериментальних статичних та динамічних ВАХ генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором подано на рис.2.

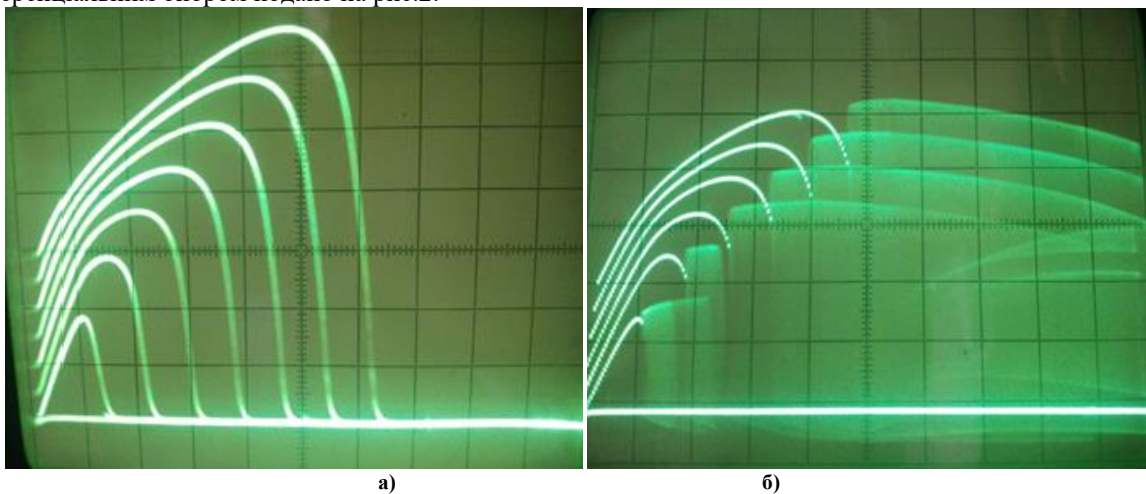


Рис.2. Сімейство експериментальних статичних (а) та динамічних (б) ВАХ генератора детермінованого хаосу (по вертикальній осі одна поділка – 1мА, а по горизонтальній осі – 1В)

Коло з резистора R1 та конденсатора C2 створює додатній зворотній зв'язок виходу генератора детермінованого хаосу з входом, що збільшує диференціальний від'ємний опір у коливальній системі пристрою. Конденсатор C1 запобігає проходженню змінного струму через джерело напруги U1.

Для вибору оптимального режиму роботи генератора детермінованого хаосу в схемі використовується два джерела живлення постійної напруги U₁ та U₂, але для зменшення собівартості генератора детермінованого хаосу в подальшому буде використано лише одне джерело живлення.

Для створення математичної моделі генератора детермінованого хаосу на рис. 3 наведено нелінійну еквівалентну схему, яка реалізує залежність частоти генерації від зміни напруги живлення та напруги керування з врахуванням основних параметрів всіх елементів генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором.

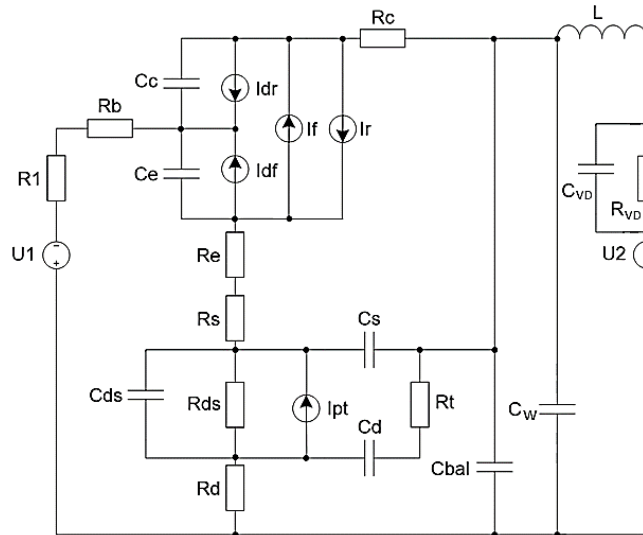


Рис. 3. Еквівалентна схема генератора детермінованого хаосу

Елементи еквівалентної схеми описуються наступним чином: L – індуктивність; R_{VD} – внутрішній опір світлодіода; C_{VD} – внутрішня ємність світлодіода; R_{ds} , R_d , R_s – об’ємні опори каналу, стоку, витоку МДН-транзистора, R_e , R_c , R_b – об’ємні опори емітера, колектора і бази біполярного транзистора; C_e , C_c – ємності емітерного і колекторного переходів біполярного транзистора; C_s , C_d – ємності затвор–витік та затвор–стік; C_{ds} – ємність каналу МДН транзистора; I_f , I_r – прямий і зворотній струм біполярного транзистора; I_{dr} , I_{df} – струми внутрішніх переходів база–колектор та база–емітер; I_{pt} – струм каналу МДН-транзистора; U_1 – джерело напруги керування, U_2 – джерело напруги живлення.

Для побудови математичної моделі генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури застосуємо метод змінних стану, який дозволяє визначити значення напруг і струмів елементів кола в кожний момент часу. Тому, використавши метод змінних стану, наведемо перетворену еквівалентну схему (рис. 4), в якій всі ємності представлені у вигляді незалежних джерел напруги, а індуктивність – джерело струму [19]. Для зручності розрахунків об’єднавши паралельні ємності C_w і C_{bal} у $C_i(T) = C_w + C_{bal}$, та струми I_f і I_r у $I_{bt} = (I_f - I_r)/QB$, де QB – коефіцієнт неідеальності переходів біполярного транзистора.

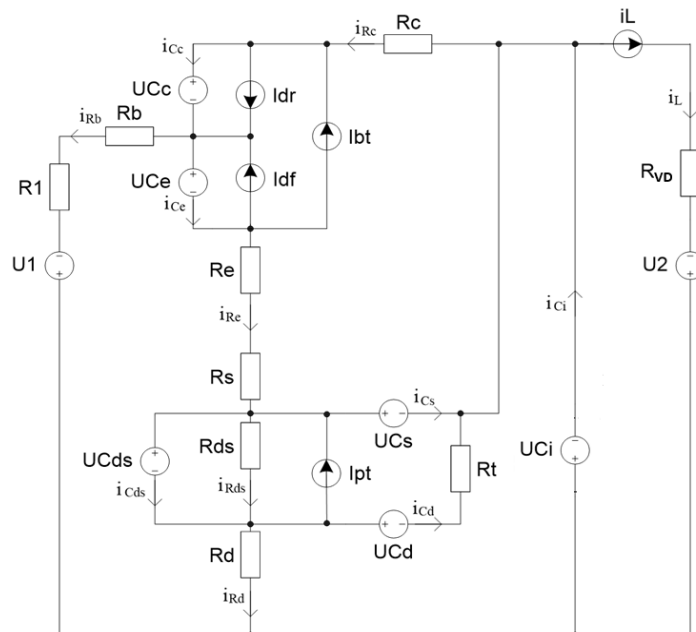


Рис. 4. Перетворена еквівалентна схема генератора детермінованого хаосу

Обравши напрямки обходу контурів і позначивши відповідні струми, запишемо систему рівнянь за законами Кірхгофа (її різновиду – методу контурних струмів). Отриману систему рівнянь використаємо для аналізу схеми методом змінних стану. На основі вибраних напрямків струмів було складено систему рівнянь Кірхгофа вираз (1). Система рівнянь (1) є нелінійною оскільки містить в собі нелінійні елементи, а саме джерела струмів I_{pt} , I_{dr} , I_{df} , $I_{bt} = (I_f - I_r)/QB$ та ємності C_c , C_e . Система рівнянь (1) є динамічною математичною моделлю генератора детермінованого хаосу, яка дозволяє визначити значення напруги або струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу.

$$\left\{ \begin{aligned} L \frac{di_L(t)}{dt} &= U_2 - (U_{C_i}(t) + i_L(t) \cdot R_{VD}); \\ C_d \frac{dU_{C_d}(t)}{dt} &= \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t}; \\ C_{ds} \frac{dU_{C_{ds}}(t)}{dt} &= \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_i}(t)}{R_d} - \frac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}} + I_{pt} + \\ &+ \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t}; \\ C_s \frac{dU_{C_s}(t)}{dt} &= - \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_i}(t)}{R_d} - \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_t} - \\ &- \frac{U_1 - U_{C_c}(t) - U_{C_i}(t) + A_3 R_c}{A_1} - A_5; \\ C_i \frac{dU_{C_i}(t)}{dt} &= i_L(t) + 2A_5 + \frac{U_1 - U_{C_c}(t) - U_{C_i}(t) + \frac{A_4 R_c}{3}}{A_1} + \\ &+ \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_i}(t)}{R_d}; \\ C_c \frac{dU_{C_c}(t)}{dt} &= A_5 + I_{bt} - I_{dr}; \\ C_e \frac{dU_{C_e}(t)}{dt} &= A_5 - \frac{U_1 - U_{C_c}(t) - U_{C_i}(t) + A_3 R_c}{A_1} + I_{bt} + I_{df}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned} A_1 &= R_b + R_t; \quad A_2 = R_e + R_t; \quad A_3 = A_2 A_1 + R_c (A_2 + A_1); \\ A_4 &= A_1 (U_{C_c} + U_{C_e} + U_{C_s}) + A_2 (U_{C_c} - U_2 + U_{C_i}(W)); \quad A_5 = \frac{A_4}{A_3}. \end{aligned}$$

Нелінійні елементи схеми описують струми нелінійних внутрішніх джерел елементів схеми. Прямий і зворотний струми переходів біполярного транзистора описуються рівняннями (2) [20]:

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

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. Струм каналу МДН-транзистора представим у вигляді нелінійно-кускової апроксимації [19]:

$$I_{pt} = \begin{cases} 0, U_{GS} - U_{VTO} \leq 0 \\ \beta \cdot (U_{GS} - U_{VTO})^2, U_{GS} - U_{VTO} \leq U_{DS} \\ \beta \cdot U_{DS} \cdot [2 \cdot (U_{GS} - U_{VTO}) - U_{DS}], U_{GS} - U_{VTO} > U_{DS}, \end{cases} \quad (4)$$

де NF, NR – коефіцієнти неідеальності МДН-транзистора в прямому та інверсному режимах функціонування; BF, BR – максимальний коефіцієнт передачі струму; U_{VTO} – порогова напруга; $\beta = \frac{1}{2} S_C W_{pL}$ – крутизна характеристики МДН-транзистора, де S_C – питома крутизна характеристики; W_{pL} – відношення ширини каналу до його довжини; $U_{GS} = U_G - U_S$ – напруга на внутрішній точці затвор-витік; $U_{DS} = U_D - U_S$ – напруга на внутрішній точці стік-витік.

Будь-яка ємність біполярного транзистора має дифузійну і бар'єрну складові в лінійному режимі функціонування. Ємність колекторного переходу C_c описується виразом:

$$C_c = C_{c_{diff}} + C_{c_b}, \quad (5)$$

де

$$C_{c_{diff}} = (I_r + I_s) \cdot TR / (U_t \cdot NR)$$

$$C_{c_b} = \begin{cases} \frac{CJC}{(1 - (U_{BC})/V_{JC})^{MJC}}, & U_{BC} < 0 \\ C_{JC}, & U_{BC} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

де U_t – температурний потенціал р-п – переходу.

Ємність емітерного переходу C_e описується виразами [20]:

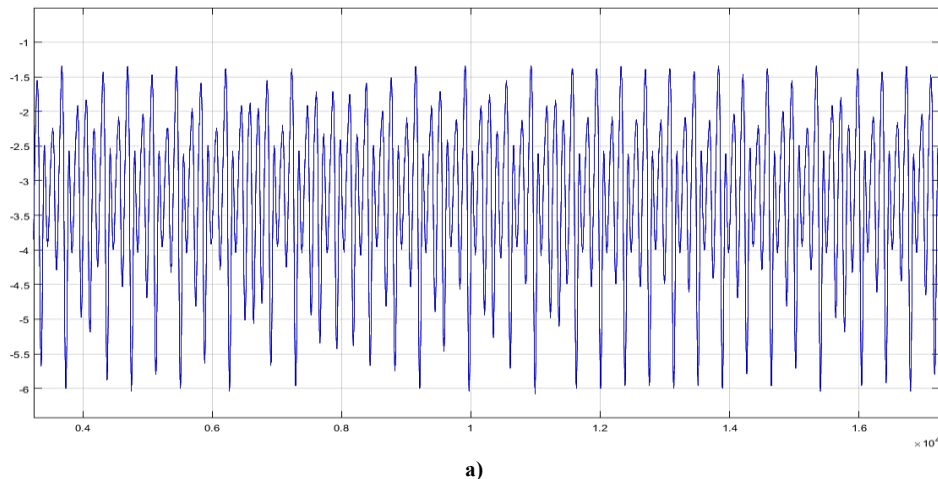
$$C_e = C_{e_{diff}} + C_{e_b}; \quad (7)$$

$$C_{e_{diff}} = (I_r + I_s) \cdot \tau_{inv} / (U_t \cdot \tau_{nor});$$

$$C_{e_b} = \begin{cases} \frac{CJE}{(1 - U_{BE}/V_{JE})^{MJE}}, & U_{BE} < 0 \\ C_{JE}, & U_{BE} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

де $C_{e_{diff}}, C_{e_b}, C_{c_{diff}}, C_{c_b}$ – диференціальна та бар'єрна ємності емітерного та колекторного переходів біполярного транзистора; τ_{inv}, τ_{nor} – час переносу заряду через базову область в інверсному та нормальному режимі функціонування; U_{JE}, U_{JC} – контактна різниця потенціалів емітерного та колекторного переходів біполярного транзистора; C_{JE}, C_{JC} – ємності емітерного та колекторного переходів біполярного транзистора; M_{JE}, M_{JC} – коефіцієнти плавності емітерного та колекторного переходів біполярного транзистора.

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.5 представлено промодельований вихідний сигнал генератора детермінованого хаосу.



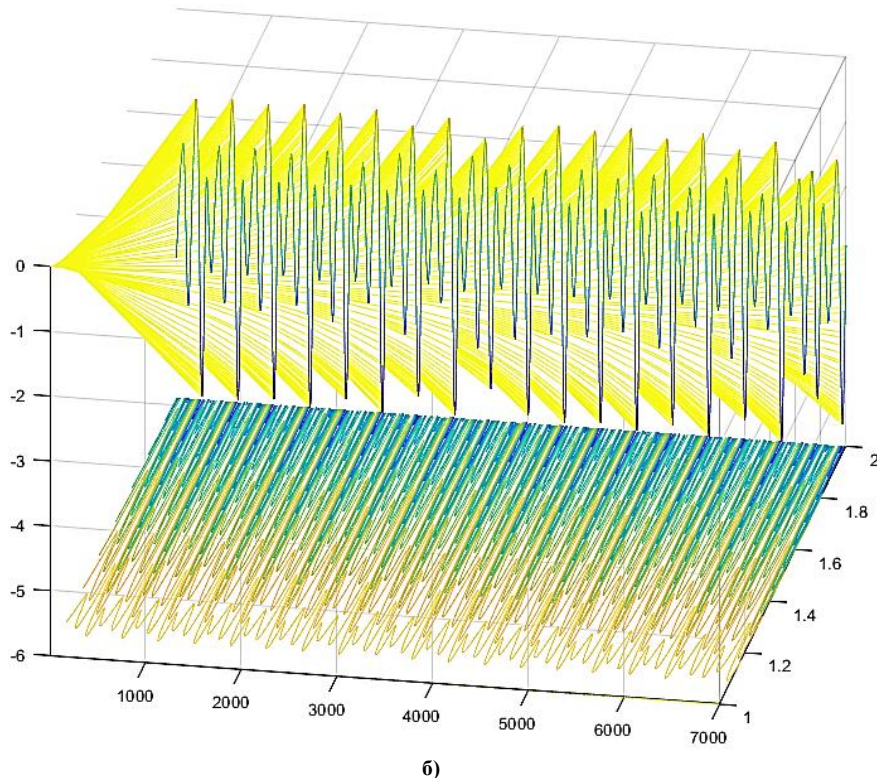


Рис.5. Промодельований вихідний сигнал генератора детермінованого хаосу а) 2D; б) 3D

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 (17,25...21,28 нс). На рис.6 представлено фазовий портрет генератора у площині динамічних змінних. На рис.7 наведені експериментальні осцилограми хаотичних коливань автогенераторної системи.



Рис.6. Фазовий портрет генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури у площині динамічних змінних

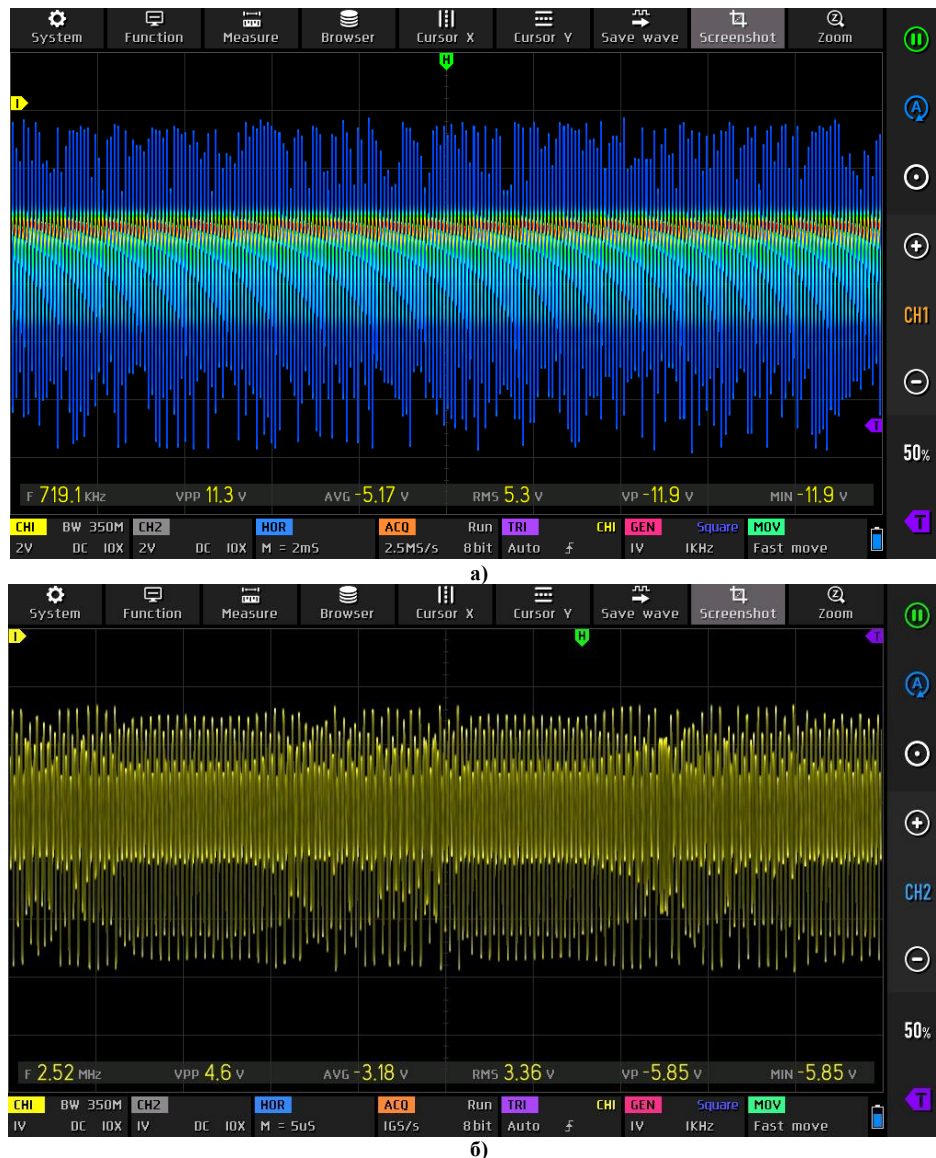


Рис. 7. Осцилограми генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури: а) напруга живлення 5 В, напруга керування 2,5 В; б) напруга живлення 5 В, напруга керування 3,5 В

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У роботі запропоновано та досліджено нове схемотехнічне рішення генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, яка має малий час встановлення стаціонарних коливань (17,25...21,28 нс). Розроблено математичну модель генератора детермінованого хаосу у вигляді диференціальних рівнянь першого порядку на основі методу змінних стану, яка дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги 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.

Література

1. Frustaci, M.; Pace, P.; Aloï, G.; Fortino, G. Evaluating Critical Security Issues of the IoTWorld: Present and Future Challenges. *IEEE Internet Things J.* 2018, 5, 2483–2495.
2. Babajans R, Cirjulina D, Kolosovs D. Field-Programmable Gate Array-Based Chaos Oscillator Implementation for Analog–Discrete and Discrete–Analog Chaotic Synchronization Applications. *Entropy*. 2025; 27(4):334. <https://doi.org/10.3390/e27040334>

3. El Hanine, M.; El-Yahyaoui, A.; Es-Sadaoui, R. Three Layer IoT Architecture: Attacks and Security Mechanisms. In Proceedings of the 2024 11th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), Vienna, Austria, 19–21 August 2024; pp. 32–38.
4. Stavroulakis, P. Chaos Applications in Telecommunications; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2006; ISBN 978-0-203-02531-4
5. 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.
6. 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.
7. 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; pp. 717–720.
8. 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.
9. Ludovico Minati. Atypical transistor-based chaotic oscillators: Design, realization, and diversity / Ludovico Minati, Mattia Frasca, Paweł Oświecimka, Luca Faes, Stanisław Drożdż // CHAOS. – 2017. – Vol. 27, 073113 (2017). – Pp. 073113-1 – 073113-13.
10. Petrzela, J. Chaotic States of Transistor-Based Tuned-Collector Oscillator. *Mathematics* 2023, 11, 2213. <https://doi.org/10.3390/math11092213>
11. Petrzela, J.; Polak, L. Minimal realizations of autonomous chaotic oscillators based on trans-impedance filters. *IEEE Access* 2019, 7, 17561–17577.
12. 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.
13. 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. – Pp. 59-91.
14. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О.. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 182 с.
15. O.V. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, “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.
16. A.V. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, “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.
17. I.A. Osadchuk, O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, A.O. Semenov, “Optical Sensor with Frequency Output Based on Resonant Tunneling Diode”, in Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022, 2022, pp. 442-446.
18. V. Osadchuk, A. Osadchuk, A. Semenov, I. Osadchuk, O. Semenova, S. Baraban, M. Prytula, “Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance”, in 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.
19. S.M. Sze and Kwok K. Ng, “Physics of Semiconductor Devices Wiley-Interscience”, USA. 2007.
20. Donald A. Neamen, Semiconductor Physics and Devices Basic Principles, New York, Published by McGraw-Hill, 2003.

References

1. Frustaci, M.; Pace, P.; Aloï, G.; Fortino, G. Evaluating Critical Security Issues of the IoTWorld: Present and Future Challenges. *IEEE Internet Things J.* 2018, 5, 2483–2495.
2. Babajans R, Cirjulina D, Kolosovs D. Field-Programmable Gate Array-Based Chaos Oscillator Implementation for Analog–Discrete and Discrete–Analog Chaotic Synchronization Applications. *Entropy*. 2025; 27(4):334. <https://doi.org/10.3390/e27040334>
3. El Hanine, M.; El-Yahyaoui, A.; Es-Sadaoui, R. Three Layer IoT Architecture: Attacks and Security Mechanisms. In Proceedings of the 2024 11th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), Vienna, Austria, 19–21 August 2024; pp. 32–38.
4. Stavroulakis, P. Chaos Applications in Telecommunications; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2006; ISBN 978-0-203-02531-4
5. 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.
6. 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.
7. 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; pp. 717–720.

8. 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.
9. Ludovico Minati. Atypical transistor-based chaotic oscillators: Design, realization, and diversity / Ludovico Minati, Mattia Frasca, Paweł Oświecimka, Luca Faes, Stanisław Drożdż // *CHAOS*. – 2017. – Vol. 27, 073113 (2017). – Pp. 073113-1 – 073113-13.
10. Petrzela, J. Chaotic States of Transistor-Based Tuned-Collector Oscillator. *Mathematics* 2023, 11, 2213. <https://doi.org/10.3390/math11092213>
11. Petrzela, J.; Polak, L. Minimal realizations of autonomous chaotic oscillators based on trans-immittance filters. *IEEE Access* 2019, 7, 17561–17577.
12. 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.
13. 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. – Pp. 59-91.
14. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Semenov A. O.. Heneratory elektrychnykh kolyvan na osnovi tranzystomykh struktur z vid'iemnym oporom. Osadchuk V. S. Heneratory elektrychnykh kolyvan na osnovi tranzystomykh struktur z vid'iemnym oporom. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2009. – 182 s.
15. O.V. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, “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.
16. A.V. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, “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.
17. I.A. Osadchuk, O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, A.O. Semenov, “Optical Sensor with Frequency Output Based on Resonant Tunneling Diode”, in *Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022*, 2022, pp. 442-446.
18. V. Osadchuk, A. Osadchuk, A. Semenov, I. Osadchuk, O. Semenova, S. Baraban, M. Prytula, “Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance”, in *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.
19. S.M. Sze and Kwok K. Ng, “Physics of Semiconductor Devices Wiley-Interscience”, USA. 2007.
20. Donald A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices Basic Principles*, New York, Published by McGraw-Hill, 2003.