

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-24>

УДК 621.373

СЕМЕНОВ Андрій

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-9580-6602>  
e-mail: [semenov.a.o@vntu.edu.ua](mailto:semenov.a.o@vntu.edu.ua)

ПІНАЄВ Богдан

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-9592-0640>  
e-mail: [pinaev.bogdam@gmail.com](mailto:pinaev.bogdam@gmail.com)

ХЛЮБА Антон

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0009-0007-6743-2456>  
e-mail: [hlobaanton@gmail.com](mailto:hlobaanton@gmail.com)

ШУРХАЛ Михайло

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0009-0005-1041-5829>  
e-mail: [misha.shurkhal@gmail.com](mailto:misha.shurkhal@gmail.com)

ОЛЬХОВИЧ Владислав

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0009-0003-8254-3972>  
e-mail: [olhovuch.vlad@gmail.com](mailto:olhovuch.vlad@gmail.com)

## МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ГЕНЕРАТОР ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНОЇ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

У статті розглянуто загально відому електричну схему релаксаційного генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором і статичною вольт-амперною характеристикою S-типу. Такий генератор є простим у виготовленні та стабільно працює в релаксаційному режимі. Шляхом включення додаткових пасивних елементів у його електричну схему забезпечено стійкий хаотичний режим генератора. Досліджено хаотичний режим релаксаційного генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором зі статичною вольт-амперною характеристикою S-типу. Розглянуто два варіанти схемотехнічної реалізації генератора детермінованого хаосу на біполярній транзисторній структурі з від'ємним диференційним опором. Автоколивальна система генератора детермінованого хаосу має четвертий порядок (два ступені вільності). Наведено математичні моделі, які описують динамічні процеси в електричній схемі генератора детермінованого хаосу. Чисельне рішення системи нелінійних диференційних рівнянь виконано з використанням методу Рунге-Кутта. У програмі Multisim було здійснене комп'ютерне моделювання електричної схеми генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором. Отримано результати комп'ютерного моделювання мікроелектронного генератора детермінованого хаосу. Моделювання проведено з використанням PSPICE моделей. Отримано часові та частотні характеристики генерованих коливань та фазові портрети мікроелектронного генератора детермінованого хаосу в площинах генерованих напруг. Керуючи величинами напруги обох джерел живлення схеми мікроелектронного генератора детермінованого хаосу є можливість змінювати параметри генерованих хаотичних напруг у широких межах при стійкій роботі генератора. У роботі наведені амплітудо-частотні спектри напруги генерованих хаотичних електричних коливань. Використовуючи отримані результати досліджень за допомогою MATLAB побудовано гістограму функції розподілу значень хаотичної напруги.

Ключові слова: детермінований хаос, транзисторна структура, від'ємний опір, фазовий портрет, функція розподілу, релаксаційний генератор.

SEMENOV Andriy, PINAIEV Bogdan,  
KHLOBA Anton, SHURKHAL Mykhailo, OLKHOVYCH Vladyslav  
Vinnytsia National Technical University

## MICROELECTRONIC DETERMINISTIC CHAOS OSCILLATOR BASED ON BIPOLAR TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE

The paper deals with a well-known electrical circuit of a relaxation oscillator based on a bipolar transistor structure with a negative differential resistance and a static S-type voltage-amperage characteristic. Such a generator is easy to manufacture and operates stably in the relaxation mode. By including additional passive elements in its electrical circuit, a stable chaotic mode of the generator is ensured. The chaotic mode of a relaxation oscillator based on a bipolar transistor structure with a negative differential resistance with a static S-type voltage-amperage characteristic is investigated. Two variants of the circuitry realization of a deterministic chaos generator based on a bipolar transistor structure with a negative differential resistance are considered. The self-oscillatory system of the deterministic chaos generator is of the fourth order (two degrees of freedom). Mathematical models

*describing dynamic processes in the electrical circuit of a deterministic chaos generator are presented. The numerical solution of the system of nonlinear differential equations is performed using the Runge-Kutta method. The electrical circuit of a deterministic chaos generator based on a bipolar transistor structure with a negative differential resistance was computer-modeled in the Multisim program. The results of computer modeling of a microelectronic deterministic chaos generator are presented. The modeling was carried out using PSPICE models. The time and frequency characteristics of the generated oscillations and phase portraits of the microelectronic deterministic chaos generator in the planes of the generated voltages are obtained. By controlling the voltage values of both power supplies of the microelectronic chaos generator circuit, it is possible to change the parameters of the generated chaotic voltages within a wide range during the stable operation of the generator. The paper presents the amplitude-frequency spectra of the generated chaotic electric oscillations. Using the obtained research results, a histogram of the distribution function of chaotic voltage values was constructed using MATLAB.*

*Keywords: deterministic chaos, transistor structure, negative resistance, phase portrait, distribution function, relaxation oscillator.*

### **Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями**

Проектування мікроелектронних генераторів детермінованого хаосу є актуальною науковою задачею, яка набула поширення в останні десятиліття [1, 2]. Це зумовлено можливістю практичного застосування електричних коливань детермінованого хаосу в радіотехнічних і телекомунікаційних системах. Для того, щоб мікроелектронний генератор детермінованого хаосу був сумісний з іншими елементами інтегральних схем потрібно вирішити ряд обмежень [3]. Основні з них зумовлені потужністю споживання, напругою живлення та діапазон частот. Ці обмеження переважно мають схемотехнічний та конструктивний характер [4]. У більшості випадків нові електричні схеми генераторів детермінованого хаосу отримано випадково або шляхом схемної реалізації математичної моделі нелінійної динамічної системи [5]. Отримано велику кількість результатів експериментальних досліджень і математичного моделювання хаотичних генераторів [6]. У той же час малу увагу приділено особливостям схемотехніки мікроелектронних генераторів детермінованого хаосу. При цьому пріоритетним є розроблення схемотехнічних рішень сумісних із мікроелектронною технологією. Вклад теорії нелінійної динаміки має істотне значення для інженерів-системотехніків. Однак, з точки зору проектування електричних схем хаотичних генераторів, лінійний підхід до проектування все ще є цінним з таких причин [3]:

1. Теорія нелінійної динаміки ще не забезпечує необхідні і достатні умови для генерації хаосу. Іншими словами, поки що не має набору умов, які, при забезпеченні їх схемною реалізацією нелінійної динамічної системи, гарантуватимуть генерацію електричних сигналів детермінованого хаосу [3].

2. Інструменти, які були розроблені в рамках математичної теорії динамічного хаосу в основному орієнтовані на математичний аналіз, а не на схемотехнічне проектування. Відсутні теоретичні відомості, як схемотехнічно створити хаотичну автоколивальну систему з потрібним динамічними розмірностями, набором власних значень, показників Ляпунова і розподілом спектральної щільності потужності [3, 4].

3. Конкретний тип динамічного хаосу пов'язаний з певними статистичними розмірностями або якісною динамікою цієї нелінійної системи. Для інженера-системотехніка здається, що всі види хаосу однакові, або практично однакові [3]. Немає чисельного підтвердження того, що хаотичний сигнал, який генерується неавтономним електричним колом є «кращим», ніж хаотичний сигнал, який генерується автономним електричним колом. Немає також підтвердження того, що генератори з активними нелінійними пристроями генерують хаос «краще», ніж з пасивними нелінійними елементами. Ідентифікація, класифікація та порівняння різних типів хаосу з точки зору його практичного застосування, як і раніше, не розроблена в повній мірі [3].

4. Лінійна теорія електричних схем загально відома. Існують відомі всім методи проектування й оптимізації, переваги і недоліки яких були детально вивчені. Неточності цієї теорії були відзначені і долаються на практиці за допомогою систем автоматичного проектування методами перебору, проб і помилок [3-6].

Таким чином, на практиці створювати нові електричні схеми генераторів детермінованого хаосу зручно на основі добре відомих автоколивальних систем, що працюють у релаксаційному режимі. У роботі автори дослідили варіант модифікованого релаксаційного генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором і статичною S-подібною ВАХ, який працює в режимі детермінованого хаосу.

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Проектування мікроелектронних генераторів детермінованого хаосу є темою наукових досліджень, яка отримує все більший інтерес протягом останніх двох десятиліть [3-9]. Це було мотивовано можливими комерційним застосування хаотичних сигналів, зокрема, в системах конфіденційного зв'язку, а також для криптографічного захисту інформації. Відомо, що хаотичні генератори були інтуїтивно винайдені або синтезовані на операційних підсилювачах шляхом реалізації електричними сигналами операцій математичних диференціальних рівнянь. Тому мало уваги було приділено розвитку методології

схемотехнічної реалізації генераторів детермінованого хаосу [3]. Теорія проектування лінійних електричних схем досі домінує і пересічні розробники електричних схем вважають непотрібним вивчення нелінійної динаміки. Тому у роботах [4-6] була запропонована методологія перенесення хаотичних генераторів з нелінійної області до лінійної. Порівняння між різними типами хаотичних генераторів можна зробити з використанням тих же критеріїв, що й для лінійних схемотехнічних рішень. Ця методологія наводиться в роботі [6]. Згідно цієї методології доведено, що будь-яка автоколивальна хаотична система здатна демонструвати просту поведінку граничного циклу, яка відповідає динаміці регулярних електричних коливань синусоїдального або релаксаційного генератора. Подальший розвиток цієї ідеї побудови генераторів детермінованого хаосу наводиться в роботах [7-9]. Так у [7] генератор побудовано на біполярній та польовій транзисторній структурі з від'ємним диференціальним опором, а в роботі [8] запропоновано нові схеми активних елементів на основі МДН-транзисторних структур з електрично керованими параметрами статичних вольт-амперних кривих  $\lambda$ -типу для детермінованих кільцевих генераторів хаосу. Генератор хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором був досліджений у [9]. Показано, що динамічні процеси в такому генераторі описуються математичною моделлю Аніщенко-Астахова [9].

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** дослідження динамічних процесів електричних коливань в простому релаксаційному генераторі автоколивальна система якого модифікована для створення хаосу шляхом безпосереднього з'єднання RC-ланки та активного елемента на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором зі статичною S-подібною ВАХ. Отриманий хаотичний генератор володіє основними характеристиками релаксаційного генератора, які полягають у низькому енергоспоживанні та низьковольтній роботі від одного або двох джерел напруги живлення. Ці особливості пояснюються застосуванням біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором зі статичною S-подібною ВАХ.

### Виклад теоретичного матеріалу

Активний елемент релаксаційного генератора, схема якого наведена на рисунку 1 (а) [3], має S-подібну ВАХ (нелінійний активний опір керований струмом) з'єднаний безпосередньо з  $R_1C_1$ -ланкою. Електричне зміщення по напрузі забезпечується джерелом живлення  $V_{CC}$ . Нелінійний активний елемент складається з транзисторів  $Q_p$  і  $Q_n$  та резистора  $R_2$ . Антисиметрична S-подібна ВАХ має дві точки повороту: пікова точка (IP, VP) і точка спаду (IV, VB), як показано на рисунку 1 (б) [3], яка отримана за допомогою PSpice моделювання обраного активного елемента з використанням біполярних транзисторів BC559 p-n-p, транзистор n-p-n Q2N2222 і резистору  $R_2$  номіналом 5 кОм. З цього рисунка точка піку (10,6 мкА, 1,1 В) і точка спаду (305 мкА, 0,7 В). Активний елемент на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором зі статичною S-подібною ВАХ має комплексний вхідний опір, реактивна складова якого носить індуктивний характер [1, 2].

Всі елементи на рисунку 1 [3] є пасивними, а тому низьке споживання енергії може бути досягнуто при досить великому значенні  $R_1$ . На рисунку 2 [3] показані генеровані релаксаційні коливання напруги при двох значеннях резистору  $R_1$  5 кОм і 10 кОм. При цьому величина ємності конденсатору  $C_1$  становить 1 нФ [3].

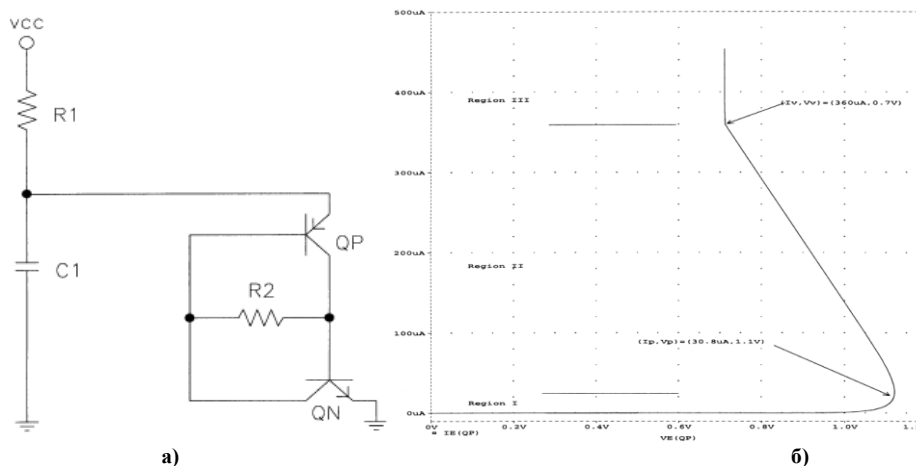


Рис. 1 Електрична схема релаксаційного генератора (а), статична ВАХ активного елемента генератора (б) [3]

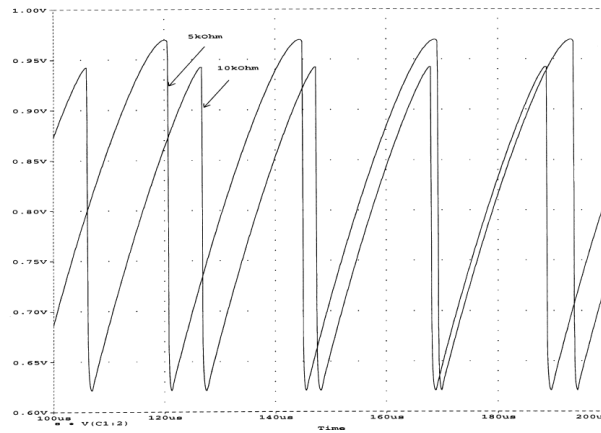


Рис. 2 Генеровані релаксаційні коливання напруги при двох значеннях резистору  $R_1$  5 кОм і 10 кОм [3]

Скорочена система рівнянь рівноваги релаксаційного генератора має вигляд (1) [3]:

$$\begin{cases} R_1 C_1 \frac{dV_{c1}}{dt} = V_{cc} - V_{c1} - R_1 I_{L0} \\ L_0 \frac{dI_{L0}}{dt} = V_{c1} - V_N \end{cases} \quad (1)$$

де  $I_{L0}$  - струм крізь паразитну транзисторну індуктивність,  $V_N$  - напруга на активному елементі генератора, ділянки якої описується системою рівнянь (2) [3]:

$$V_N = \begin{cases} \frac{V_p}{I_p} I_{L0}; 0 \leq I_{L0} \leq I_p, \\ V_p - \frac{V_p - V_v}{I_v - I_p} (I_{L0} - I_p); I_p \leq I_{L0} \leq I_v, \\ V_v; I_{L0} \geq I_v. \end{cases} \quad (2)$$

Переходячи до безрозмірних змінних отримуємо (3) [3]:

$$X = \frac{V_{c1}}{V_{ref}}, W = \frac{R_1 I_{L0}}{V_{ref}}, \tau = \frac{t}{R_1 C_1}, K = \frac{V_{cc}}{V_{ref}}, P_1 = \frac{V_p}{V_v}, P_2 = \frac{I_v}{I_p}, V_{Vn} = \frac{V_v}{V_{ref}}, \alpha = \frac{R_1 I_v}{V_{ref}}, \beta_0 = \frac{R_1^2 C_1}{L_0}, \quad (3)$$

де  $V_{ref}$  - довільна постійна напруга для нормування функції апроксимації (2).

У безрозмірних змінних система диференціальних рівнянь має вигляд у матричній формі (4) [3]:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ \beta_0 & -b\beta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K \\ -\alpha\beta_0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де функція апроксимації статичної ВАХ біполярної транзисторної структури з від'ємним опором у нормованих змінних має вигляд (5) [3]:

$$\begin{cases} a = 0, b = \frac{P_1 P_2}{\alpha} V_{Vn}, 0 \leq W \leq \frac{\alpha}{P_2} \\ a = \left[ P_1 + \frac{P_1 - 1}{P_2 - 1} \right] V_{Vn}, b = -\frac{P_2 (P_1 - 1)}{P_2 - 1} \frac{V_{Vn}}{\alpha}, \frac{\alpha}{P_2} \leq W \leq \alpha \\ \alpha = 0, b = V_{Vn}, W \geq \alpha \end{cases} \quad (5)$$

Чисельне рішення рівняння (4) проведено з використанням методу Рунге-Кутта за таких умов:  $K=1,5$ ,  $P_1=1,5$ ,  $P_2=50$ ,  $V_{Vn}=0,7$ ,  $\alpha=5$ ,  $\beta=10^4$ . На рисунку 3 наведений графік релаксаційних коливань напруги, які мають вигляд пилки [3]. Зауважимо, що рівняння (4) є жорстким і що воно має три точки рівноваги, по одному в кожному з трьох областей роботи нелінійного активного елементу [3].

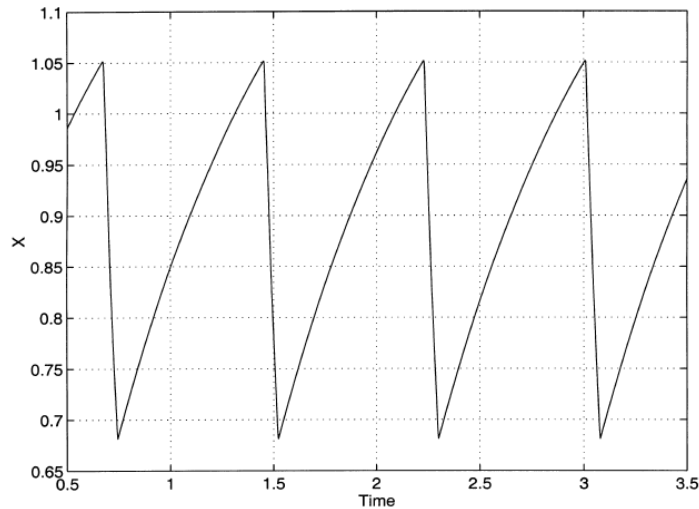


Рис. 3 Часова діаграма нормованої змінної  $x$  [3]

Для переходу від релаксаційного генератору до хаотичного до його схеми потрібно ввести реактивні елементи. У попередньому пункті при дослідженні було зазначено паразитну індуктивність транзисторної структури  $I_{L0}$ . Ця паразитна індуктивність має різні значення при різних положеннях робочої точки на статичній ВАХ. Щоб її зафіксувати, до схеми релаксаційного генератору потрібно ввести котушку індуктивності, а для забезпечення 3-го порядку автоколивальної системи – ще один конденсатор. Можливі два основні схемотехнічні варіанти такого хаотичного генератору, які подані на рисунку 4 (а, б) [3].

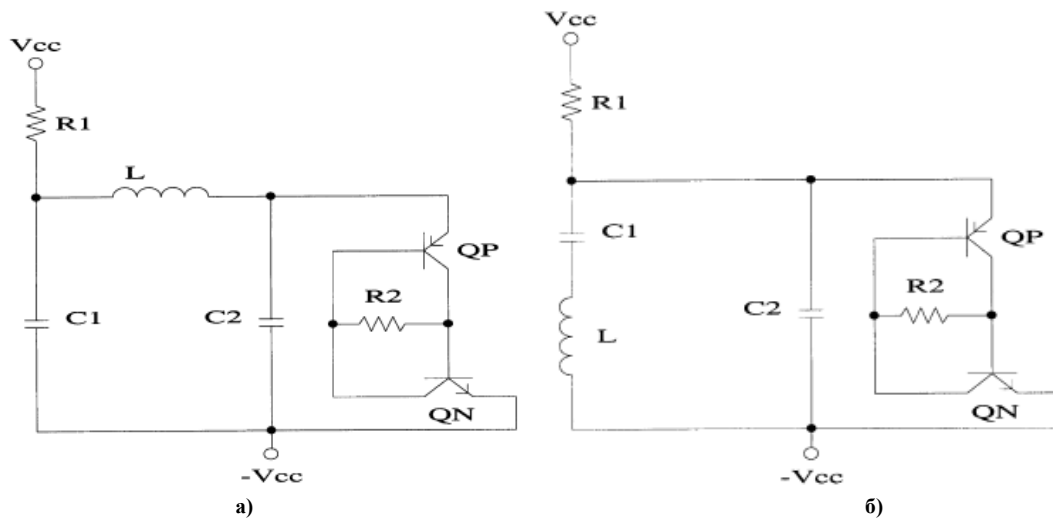


Рис. 4 Перший (а) та другий (б) варіант електричної схеми генератору з від'ємним опором [3]

У роботі як основну схему хаотичного генератора було обрано схему на рисунку 4 (а). Якщо релаксаційний генератор (рисунок 1, (а)) модифікувати для отримання хаосу без введення в схему активних елементів, можна очікувати, що отриманий хаотичний генератор успадкує його низьковольтні та малопотужні характеристики. Дійсно, це може бути досягнуто, як показано на рисунку 4 (а), шляхом приєднання нелінійного резистора до кола синхронізації  $R_1C_1$  через котушку індуктивності  $L$ .  $C_2$  діє як конденсатор зв'язку і повинен бути меншим, ніж  $C_1$ . Основна ідея полягає щоб замінити таким чином прямий зв'язок нелінійного резистора і коло синхронізації за допомогою індуктивного зв'язку.

Система рівнянь рівноваги схеми генератора на рисунку 4 (а) має вигляд (6) [3]. На відміну від релаксаційного генератора система диференціальних рівнянь хаотичного генератора має 4-й порядок. Це зумовлено такими реактивними елементами: котушкою індуктивності, двома конденсаторами та еквівалентною індуктивністю біполярної транзисторної структури з від'ємним опором [3].

$$\begin{cases} R_1C_1 \frac{dV_{c1}}{dt} = V_{cc} - V_{c1} - R_1I_L, \\ C_2 \frac{dV_{c2}}{dt} = I_L - I_{L0}, \\ L \frac{dI_L}{dt} = V_{c1} - V_{c2}, \\ L_0 \frac{dI_{L0}}{dt} = V_{c2} - V_N. \end{cases} \quad (6)$$

Система рівнянь рівноваги (6) у нормованих змінних у матричній формі має вигляд (7) [3]:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \gamma \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ \beta & -\beta & 0 & 0 \\ 0 & \beta_0 & 0 & -b\beta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K \\ 0 \\ 0 \\ -\alpha\beta_0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де точки переходів між гілками ВАХ повинні задовольняти умові (8) [3]:

$$\begin{cases} K > \alpha + V_{Vn}, \\ \frac{\alpha}{P_2} - 2 \frac{P_1 - 1}{P_2 - 1} V_{Vn} < K + P_1 V_{Vn} < \alpha - \frac{(P_1 - 1)(P_2 - 1)}{P_2 - 1} V_{Vn}, \\ K < \frac{\alpha}{P_2} + P_1 V_{Vn}. \end{cases} \quad (8)$$

#### Результати експериментальних досліджень

Для проведення дослідження у Multisim 10.1 було зібрано схему з рисунка 4 (а), вона наведена на рисунку 5 [10]. Були отримані фазові портрети у площинах генерованих напруг  $U_{C1}$  та  $U_{C2}$ , які подано на рисунках 6 (а-г) та 7 (а-г).

Осцилограми генерованих напруг  $U_{C2}$  та  $U_{C1}$  при значенні напруги живлення  $V_1 = V_2 = 1,0$  В подані на рисунку 8. На рисунку 9 представлені осцилограми генерованих хаотичних напруг  $U_{C2}$  та  $U_{C1}$  при різних значеннях напруги живлення джерел  $V_1$  і  $V_2$ . На рисунку 10 представлені амплітудно-частотні спектри генерованих хаотичних напруг  $U_{C2}$  та  $U_{C1}$  при різних значеннях напруги живлення джерел  $V_1$  і  $V_2$ .

Експеримент показав, що досліджувана схема генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором і статичною S-подібною ВАХ стабільно працює у режимі детермінованого хаосу при різних значеннях напруги живлення. Імпортувавши отримані данні після моделювання у MATLAB 7.0.1 булj проведено статистичну обробку, отримані графіки наведені нижче (рисунок 11 а, б).

З отриманих результатів можна зробити висновок, що при зміні величин напруги генераторів V1 і V2 є можливість керування параметрами хаотичних напруг [10]. З рисунку 6 (в, г) при V1 = 1,5 В і V2 = 1,5 В фазовим портретом є атрaktorом з граничним циклом, через це відбувається перехід до періодичних коливань з хаотичних, частота яких поблизу 5 МГц. Якщо є потреба збільшити напруги живлення, тоді спершу необхідно збільшити номінал R1 до значення 28 кОм.

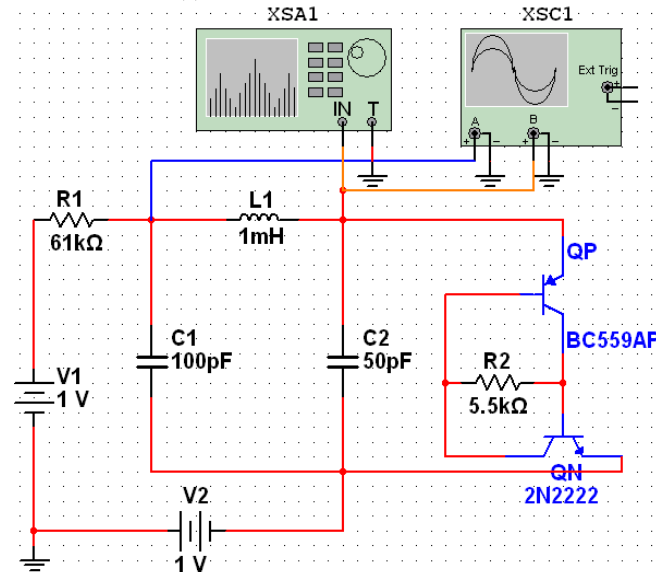


Рис 5 Електрична схема генератора детермінованого хаосу в програмі Multisim 10.1

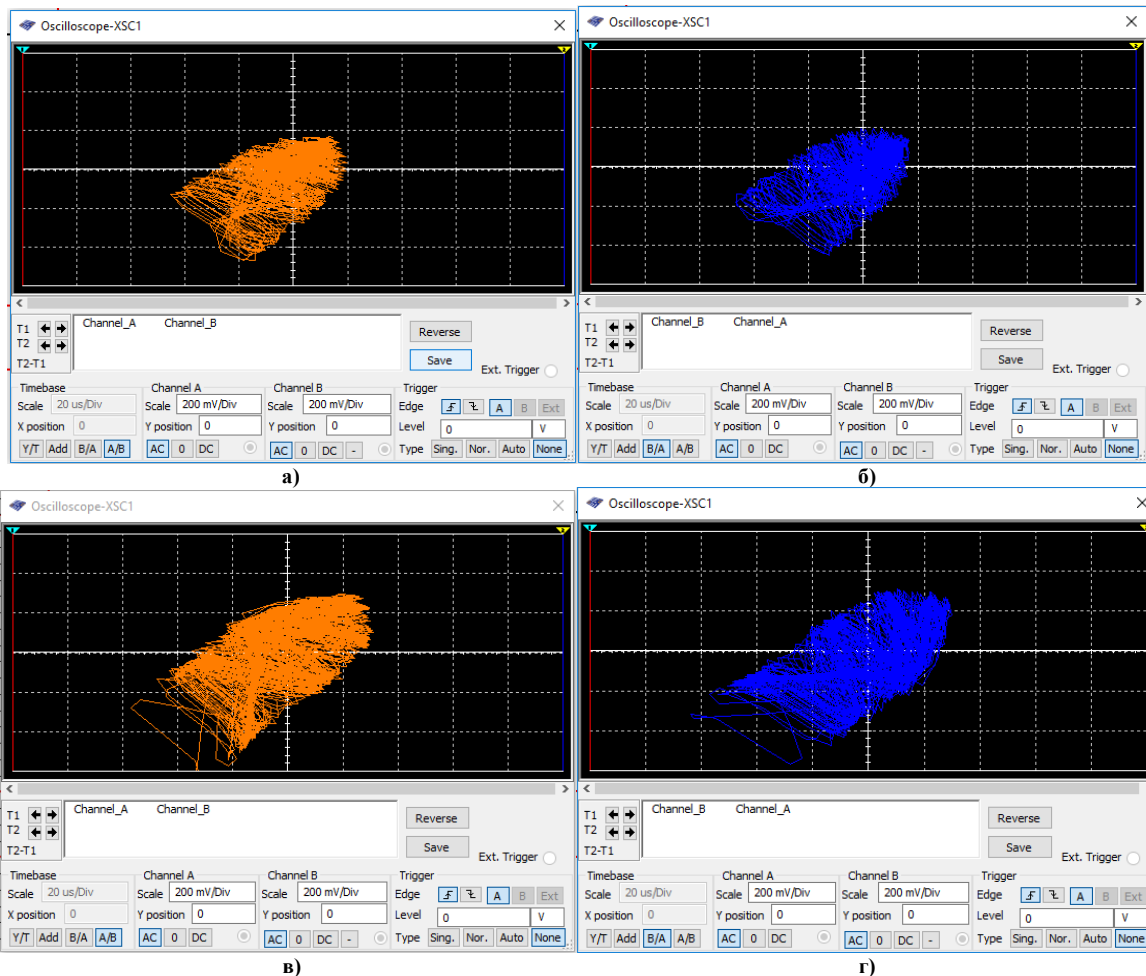


Рис. 6 Фазові портрети генератора детермінованого хаосу в площині напруг UC1–UC2: а) А/В, б) В/А при V1 = 1,0 В і V2 = 1,0 В; в) А/В, г) В/А при V1 = 1,5 В і V2 = 1,0 В;

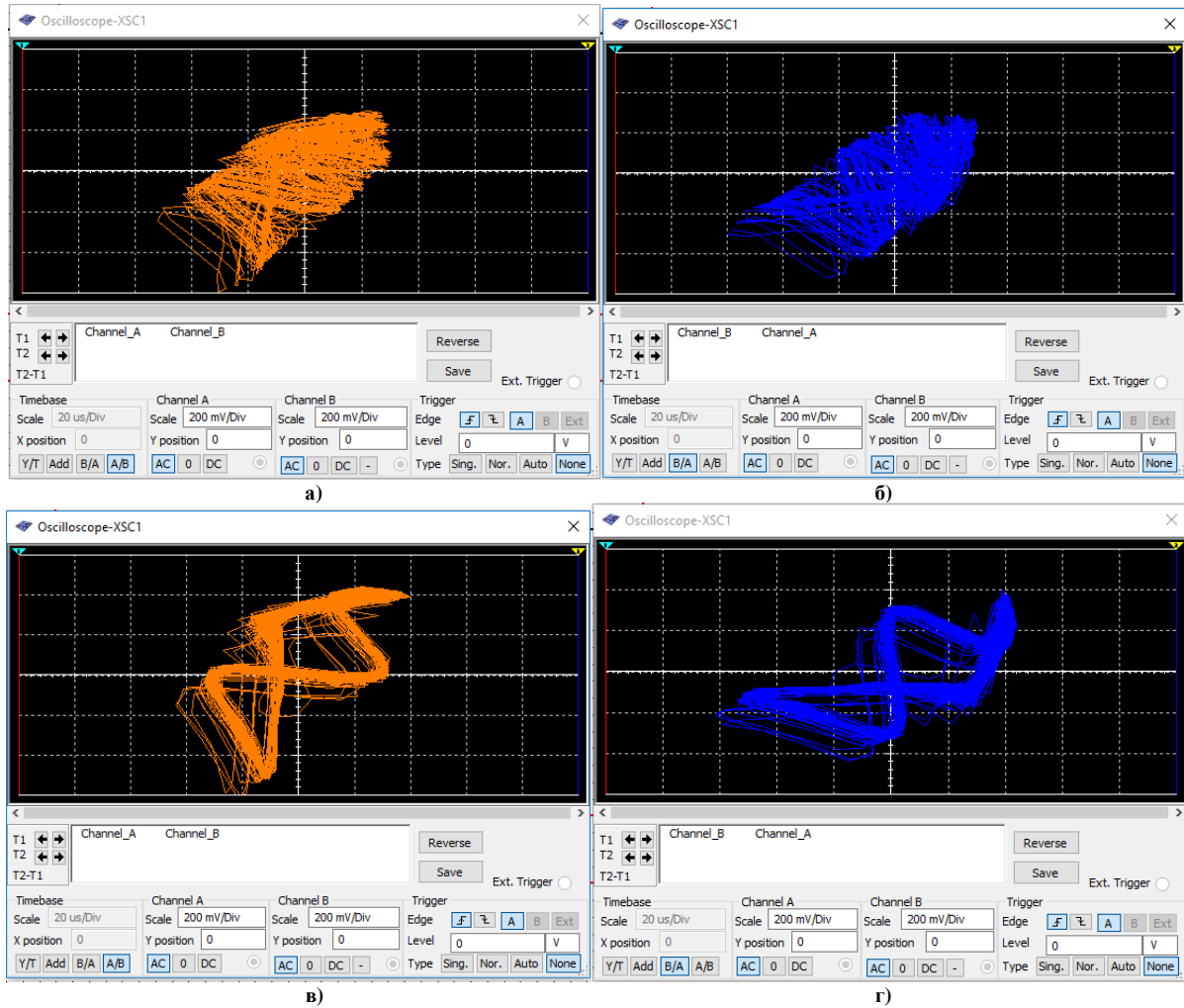


Рис. 7 Фазові портрети генератора детермінованого хаосу в площині напруг  $UC_1-UC_2$ : а) A/B, б) B/A при  $V_1 = 1,0$  В і  $V_2 = 1,5$  В, в) A/B, г) B/A при  $V_1 = 2,0$  В і  $V_2 = 2,0$  В

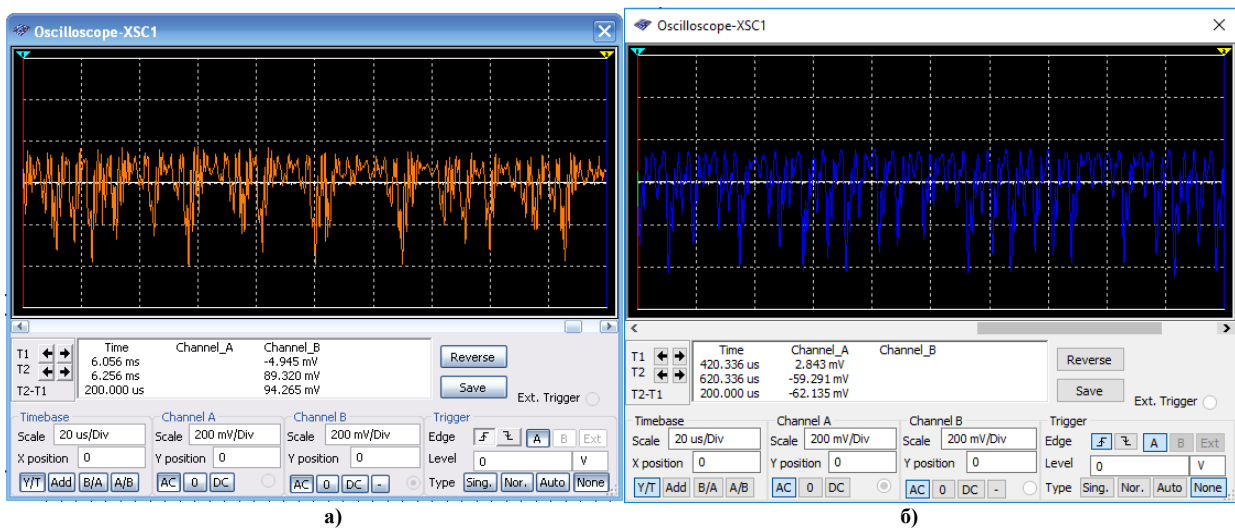


Рис. 8 Осцилограми напруг  $UC_2$  (а) та  $UC_1$  (б) при  $V_1 = V_2 = 1,0$  В



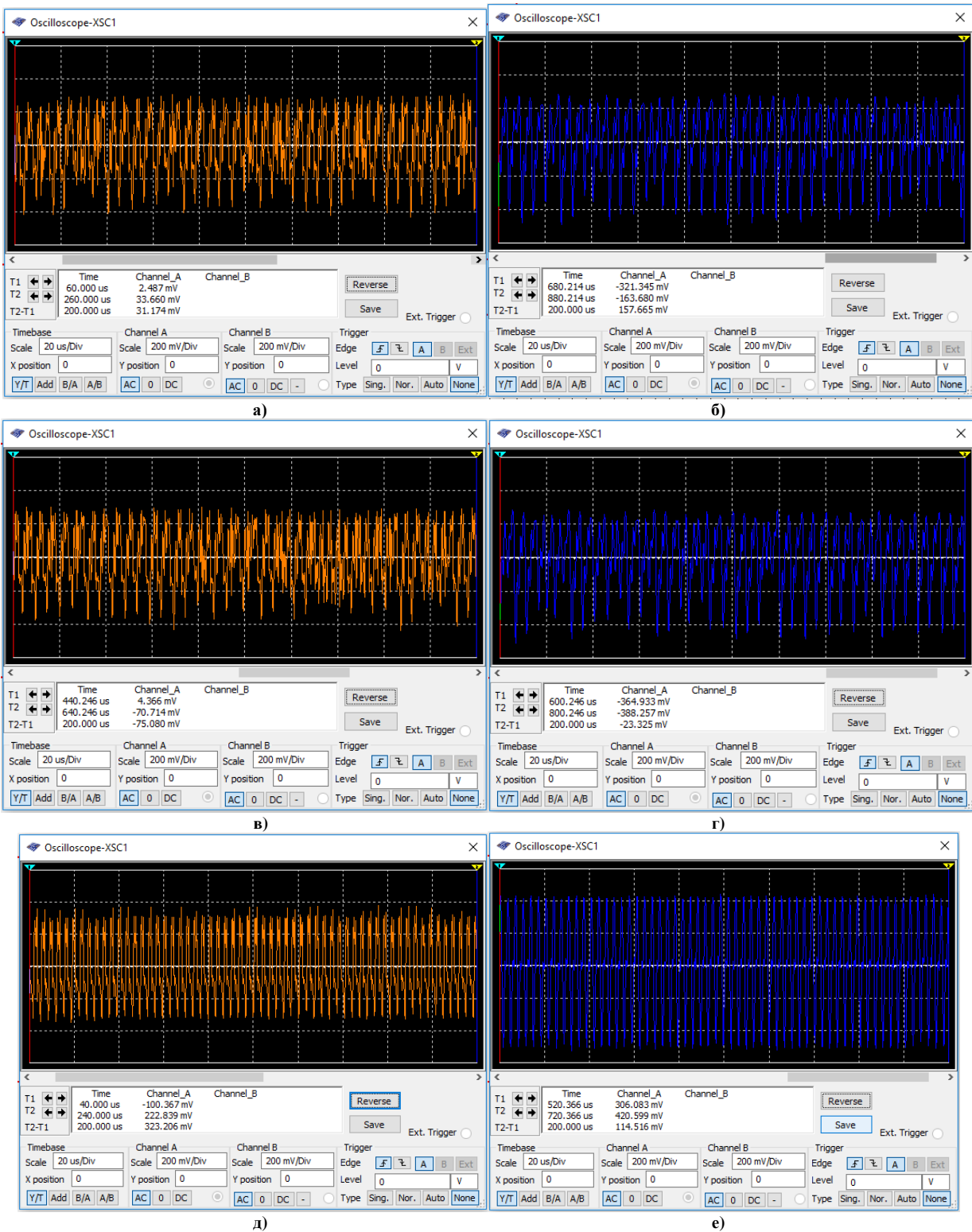


Рис. 9 Осцилограми генерованих хаотичних напруг UC2 (а) та UC1 (б) при  $V_1 = 1,5$  В і  $V_2 = 1,0$  В; UC2 (в) та UC1 (г) при  $V_1 = 1,0$  В і  $V_2 = 1,5$  В; UC2 (д) та UC1 (е) при  $V_1 = 2,0$  В і  $V_2 = 2,0$  В

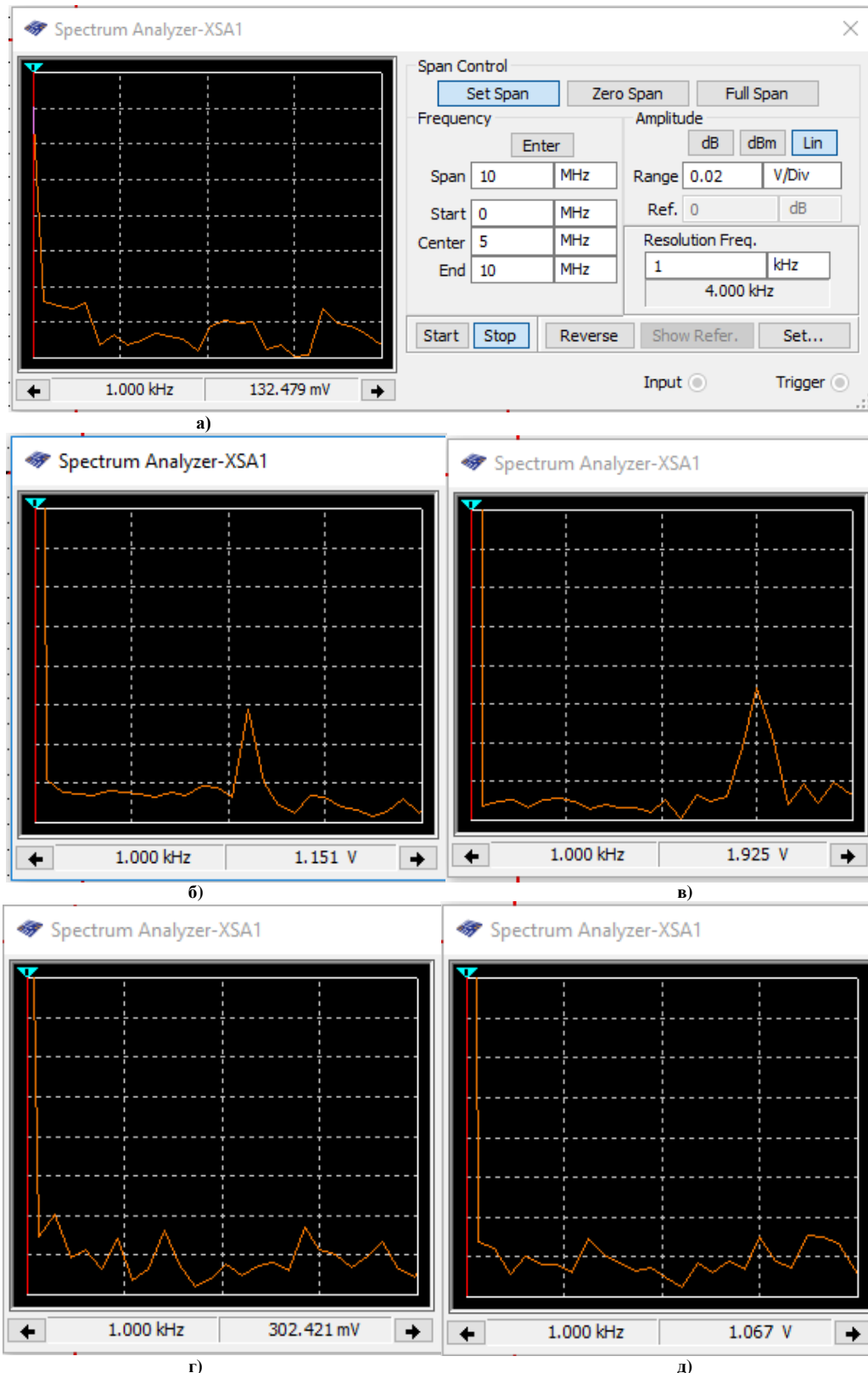


Рис 10 Амплітудо-частотні спектри генерованої хаотичної напруги  $U_{C2}$  при а)  $V1 = 1 \text{ B}$  і  $V2 = 1 \text{ B}$ ; б)  $V1 = 1,5 \text{ B}$  і  $V2 = 1,5 \text{ B}$ ; в)  $V1 = 2 \text{ B}$  і  $V2 = 2 \text{ B}$  г)  $V1 = 1,5 \text{ B}$  і  $V2 = 1 \text{ B}$ ; д)  $V1 = 1 \text{ B}$  і  $V2 = 1,5 \text{ B}$

Статистичні характеристики для електричних коливань  $U_{C2}$  були опрацьовані в програмі MATLAB, таким чином були отримані графіки, що наведені на рисунку 11 (а, б) [10]. Аналізуючи 11 (б) наглядно

видно відхилення від нормального закону розподілу графіка для  $U_{C2}$ . З цього був зроблений висновок про хаотичний характер динамічного процесу.

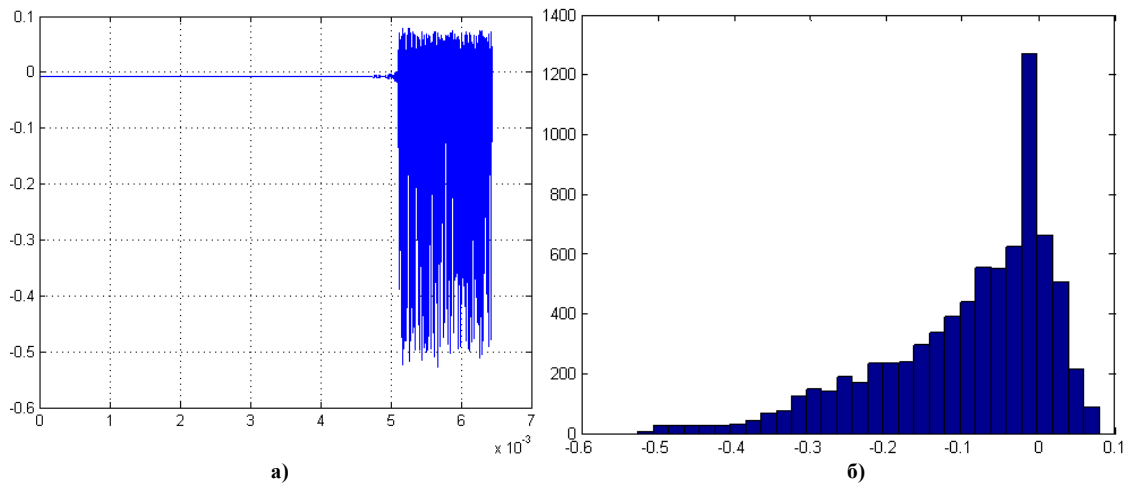


Рис. 11 Отримані дані у MATLAB: діаграма часу (а), функції розподілу у вигляді гистограми (б)

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі апробовано математичну модель і досліджено схему релаксаційний генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором зі статичною S-подібною ВАХ, яку було застосовано для дослідження режиму детермінованого хаосу. Підтверджена працездатність запропонованої схеми хаотичного генератора та отримано і досліджено фазові портрети нелінійної автоколивної системи, амплітудо-частотних спектри та часові характеристики хаотичних електричних коливань. Отримана гистограма функції розподілу підтверджує хаотичність автоколивного процесу. При зміні величин напруги генераторів  $V1$  і  $V2$  існує можливість керування параметрами хаотичних напруг генератора. Перевагами дослідженого генератора є: 1) простота схеми та можливість реалізації за мікроелектронною технологією у вигляді інтегральної мікросхеми; 2) генератор працює в релаксаційному та хаотичному режимах генерації електричних коливань; 3) електрична керованість режимами та параметрами генерованих релаксаційних і хаотичних коливань.

### Література

1. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 184 с.
2. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2011. – 336 с.
3. Elwakil, A. S., & Kennedy, M. P. A low-voltage, low-power, chaotic oscillator, derived from a relaxation oscillator. *Microelectronics Journal*. 2000. Vol. 31, Issue 6, pp. 459–468. Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s0026-2692\(99\)00150-0](https://doi.org/10.1016/s0026-2692(99)00150-0)
4. Elwakil AS, Kennedy MP. Towards a methodology for designing autonomous chaotic oscillators. *Proceedings of the 6th International Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems NDES'98*, Budapest, 1998; 79–82.
5. Elwakil, A. S., & Kennedy, M. P. Chaotic oscillator configuration using a frequency dependent negative resistor. *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuits and Systems VLSI (Cat. No.99CH36349)*. ISCAS'99. 1999 <https://doi.org/10.1109/iscas.1999.777593>
6. Elwakil, A., & Kennedy, M. Chua's circuit decomposition: A systematic design approach for chaotic oscillators. 2000. *Journal of the Franklin Institute*, 337 (2), 251-265. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(00\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(00)00019-3)
7. Semenov, A. Deterministic chaos oscillator based on a bipolar and field-effect transistor structure with negative resistance. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2016. IEEE. <https://doi.org/10.1109/dynamics.2016.7819081>
8. Semenov, A., Osadchuk, O., Semenova, O., Koval, K., Baraban, S., & Savytskyi, A. A Deterministic Chaos Ring Oscillator Based on a MOS Transistor Structure with Negative Differential Resistance. *IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/picst47496.2019.9061330>
9. Semenov, A. O., Osadchuk, A. V., Osadchuk, I. A., Koval, K. O., & Prytula, M. O. 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. <https://doi.org/10.1109/edm.2016.7538720>

10. Семенов А.О. Експериментальне дослідження малопотужного транзисторного генератору детермінованого хаосу засобами вимірювання National Instruments Multisim. Матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (БОТТП\_17\_2017) 8 – 13 червня 2017 р. стр. 211-213

### References

1. Osadchuk V. S. Heneratory elektrychnykh kolyvan na osnovi tranzystornykh struktur z vid'iemnym oporom : monohrafiia / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, A. O. Semenov. – Vinnytsia: VNTU, 2009. – 184 s.
2. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Semenov, A. O., Koval K. O. Functional units of radio measuring devices based on the reactive properties of transistor structures with negative resistance: monograph. Vinnytsia: VNTU, 2011. – 336 p.
3. Elwakil, A. S., & Kennedy, M. P. A low-voltage, low-power, chaotic oscillator, derived from a relaxation oscillator. *Microelectronics Journal*. 2000. Vol. 31, Issue 6, pp. 459–468. Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/s0026-2692\(99\)00150-0](https://doi.org/10.1016/s0026-2692(99)00150-0)
4. Elwakil AS, Kennedy MP. Towards a methodology for designing autonomous chaotic oscillators. *Proceedings of the 6th International Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems NDES'98*, Budapest, 1998; 79–82.
5. Elwakil, A. S., & Kennedy, M. P. Chaotic oscillator configuration using a frequency dependent negative resistor. *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Circuits and Systems VLSI (Cat. No.99CH36349)*. ISCAS'99. 1999 <https://doi.org/10.1109/iscas.1999.777593>
6. Elwakil, A., & Kennedy, M. Chua's circuit decomposition: A systematic design approach for chaotic oscillators. 2000. *Journal of the Franklin Institute*, 337 (2), 251-265. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(00\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(00)00019-3)
7. Semenov, A. Deterministic chaos oscillator based on a bipolar and field-effect transistor structure with negative resistance. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2016. IEEE. <https://doi.org/10.1109/dynamics.2016.7819081>
8. Semenov, A., Osadchuk, O., Semenova, O., Koval, K., Baraban, S., & Savytskyi, A. A Deterministic Chaos Ring Oscillator Based on a MOS Transistor Structure with Negative Differential Resistance. *IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. 2019. <https://doi.org/10.1109/picst47496.2019.9061330>
9. Semenov, A. O., Osadchuk, A. V., Osadchuk, I. A., Koval, K. O., & Prytula, M. O. 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. <https://doi.org/10.1109/edm.2016.7538720>
10. Semenov, A. O. Experimental study of a low-power transistor generator of deterministic chaos by means of measurement National Instruments Multisim. *Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference. Measuring and computing equipment in technological processes (BOTTP\_17\_2017) June 8 - 13 2017*. pp. 211-213