

Семенов А.О.

Вінницький національний технічний університет

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

У роботі наведено результати теоретичних досліджень та математичного моделювання генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Отримала подальший розвиток математична модель Аніщенко-Астахова, яка є однією з базових моделей теорії детермінованого хаосу. Запропоновано рівняння апроксимації статичної ВАХ біполярної транзисторної структури за допомогою функції гіперболічного тангенсу. Досліджено динаміку генерованих хаотичних коливань шляхом математичного моделювання. Отримано нормовані часові діаграми та амплітудо-частотні спектри хаотичних коливань напруги на конденсаторі та струму індуктивності.

Ключові слова: генератор, детермінований хаос, транзисторна структура, математична модель, від'ємний опір, фазовий портрет.

Постановка проблеми. Розробка та дослідження мікроелектронних генераторів детермінованого хаосу є актуальною науковою задачею, яка набула поширення в останні роки. Це зумовлено можливістю практичного застосування електричних хаотичних коливань у телекомунікаційних системах [1, с. 9]. Щоб мікроелектронний генератор детермінованого хаосу був сумісний із іншими елементами інтегральних схем, потрібно вирішити ряд обмежень. Основні з них – це потужність споживання, напруга живлення та діапазон частот [2, с. 10]. Ці обмеження переважно мають схемотехнічний характер. У більшості випадків електричні схеми генераторів детермінованого хаосу отримано випадково або шляхом реалізації математичної моделі нелінійної динамічної системи [3, с. 460]. Отримано велику кількість результатів експериментальних досліджень і математичного моделювання хаотичних генераторів. Водночас мало уваги приділено особливостям схемотехніки мікроелектронних генераторів детермінованого хаосу [3, с. 460]. Пріоритетом є розробка схемотехнічних рішень, сумісних із мікроелектронною технологією [2, с. 10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для побудови мікроелектронних генераторів осциляторних або релаксаційних коливань широко застосовують транзисторні структури з ВАХ Λ -, N - або S - типу [3–5]. Теорія таких генераторів давно розроблена і є відомою. Електричні параметри тран-

зисторних структур з ВАХ Λ -та N -типів керуються напругою, а параметри транзисторних структур з ВАХ S - типу – струмом. Управління електричними параметрами приладів із ВАХ S -типу здійснюється у вузьких межах керуючих напруг і струмів та потребує додаткових схемотехнічних рішень для забезпечення стійкості роботи. Тому для побудови генераторів широко застосовують прилади з ВАХ Λ -та N -типів. У літературі висвітлені питання розробки та дослідження генераторів на основі приладів з ВАХ Λ -та N -типів, які працюють у релаксаційному або осциляторному режимах. Нелінійні та хаотичні режими роботи таких генераторів мало досліджені [6].

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: 1) здійснити аналіз схеми генератора детермінованого хаосу; 2) розробити математичну модель та аналітично дослідити динаміку генерованих коливань; 3) розробити комп'ютерну схемотехнічну модель генератора детермінованого хаосу та порівняти результати моделювання з аналітично отриманими.

Виклад основного матеріалу дослідження. Електрична схема генератора детермінованого хаосу наведена на рис. 1а. На рис. 1б наведено сімейство статичних ВАХ біполярної транзисторної структури з від'ємним опором [6].

Генератор працює таким чином. Шляхом вибору напруги керування V_2 і напруги живлення V_1 робоча точка встановлюється на спадній ділянці ВАХ. У такому разі комплексний опір активного елемента генератора на електродах «колектор VT1 – колектор VT2» для змінного струму має від’ємні активну і реактивну складові частини. Паралельно активному елементу генератора підключений конденсатор C_2 для зменшення впливу амплітуди коливань на величину ємнісної складової реактивного опору транзисторної структури VT1 – VT2. Конденсатор C_1 використаний для шунтування джерела напруги живлення V_1 від змінного струму. Коливальний контур генератора складається з котушки індуктивності L_1 і ємнісного елемента у вигляді реактивної складової частини опору транзисторної структури VT1 – VT2 з паралельно підключеним конденсатором C_2 . У вітку індуктивності підключене коло з послідовно з’єднаних діода VD_1 та резистора R_4 .

Це коло вносить додаткову нелінійність у коливальний контур генератора.

Аналітичне дослідження фізичних процесів у генераторі на рис. 1а здійснено з використанням математичної моделі Аніщенко-Астахова вигляду:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = mx_1 + x_2 - x_1x_3 - d \cdot G(x_1), \\ \dot{x}_2 = -x_1, \\ \dot{x}_3 = -gx_3 + g \cdot I(x_1) \cdot F(x_1), \end{cases} \quad (1)$$

де $F(x_1)$ – нормована функція апроксимації статичної ВАХ діоду;

$G(x_1)$ – нормована функція апроксимації робочої вітки з сімейства ВАХ біполярної транзисторної структури;

$I(x_1)$ – функція, яка описує умову пропускання струму крізь діод у прямому напрямку;

m – параметр автоколивальної системи, який пропорційний різниці внесеної в коливальний контур та розсіяної енергії ($m=0,6...1,2$);

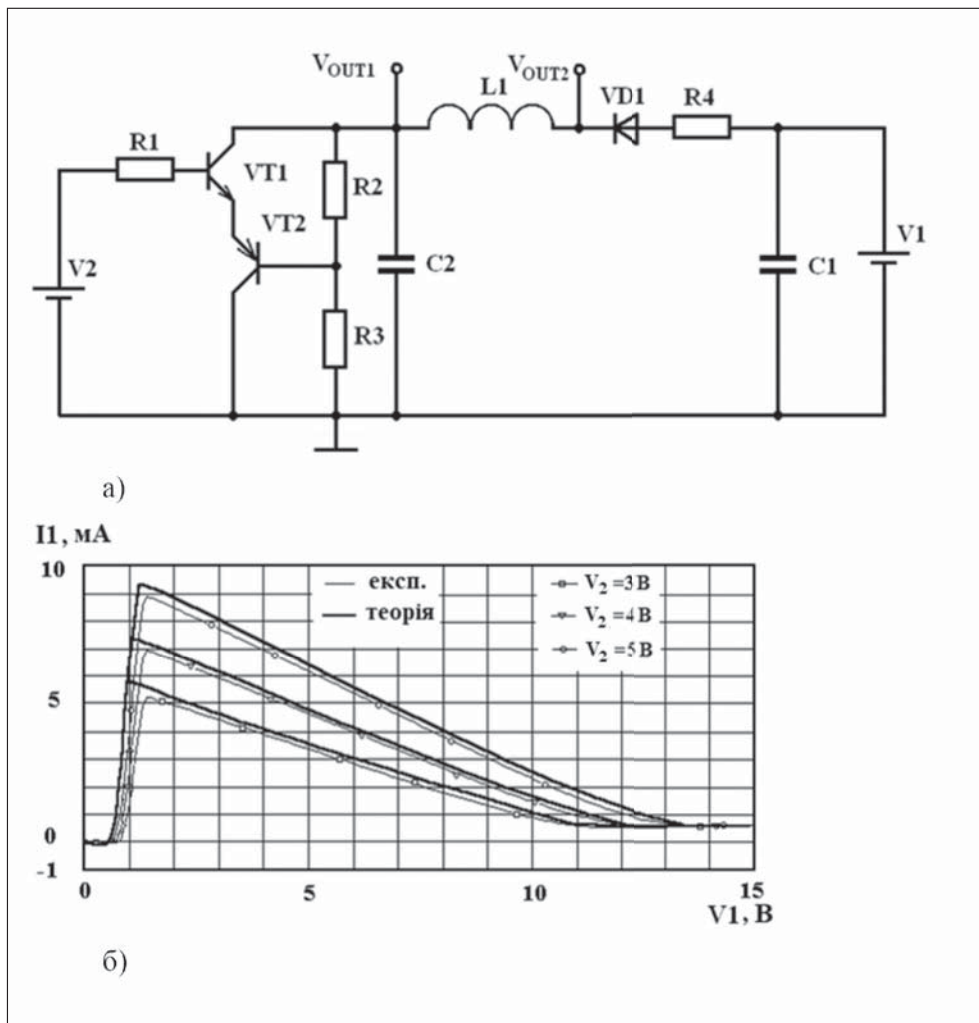


Рис. 1. Електрична схема генератора детермінованого хаосу (а) та сімейство ВАХ біполярної транзисторної структури з від’ємним опором (б)

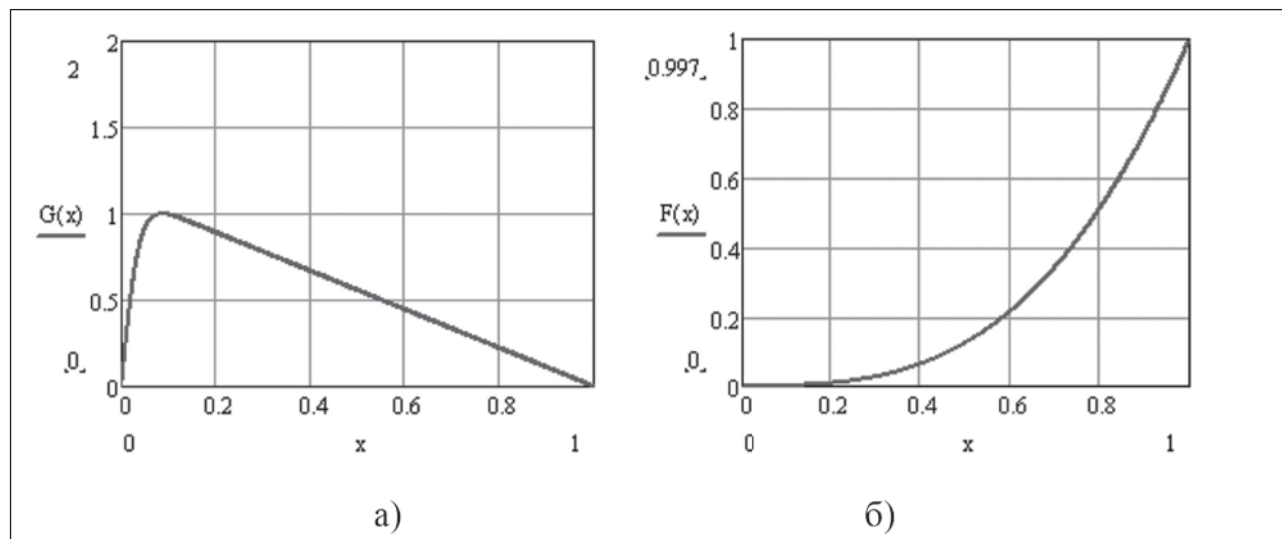


Рис. 2. Нормовані характеристики вітки ВАХ транзисторної структури VT1 – VT2 (а) та ВАХ діода VD1 (б)

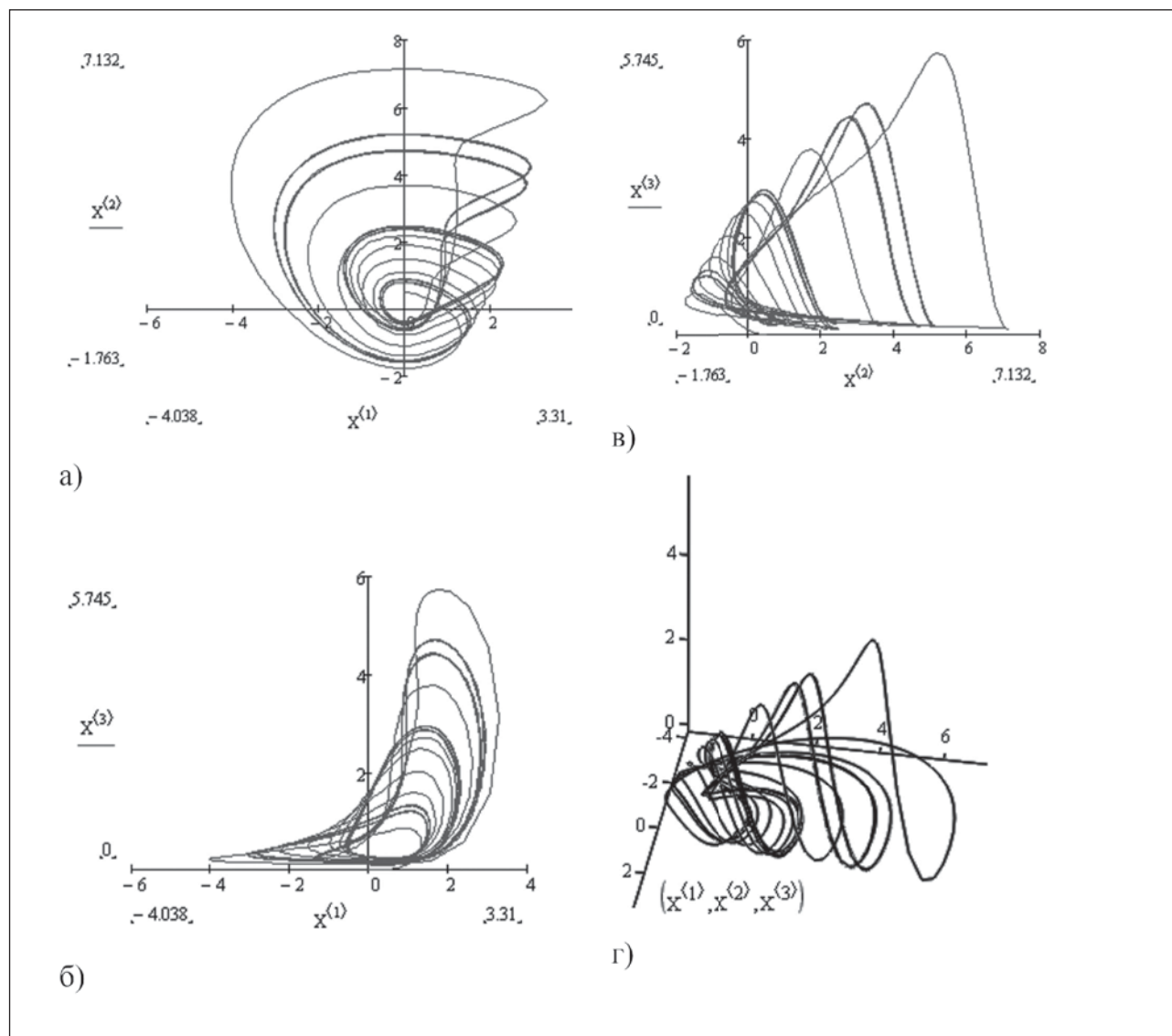


Рис. 3. Фазові портрети генератора детермінованого хаосу в площинах змінних x_1-x_2 (а), x_1-x_3 (б) і x_2-x_3 (в) і в просторі змінних $x_1-x_2-x_3$ (г)

g – параметр автоколивальної системи, який пропорційний відношенню часу релаксації інерційного елемента ($g=0,1\dots 0,9$);

d – малий параметр, який відповідає ступеню впливу нелінійності крутизни ВАХ транзисторної структури ($d=0,1\dots 0,2$) [1, с. 175; 7, с. 57–59].

Для подальших теоретичних досліджень автором у [6] були отримані функції апроксимації в нормованих змінних нормованої гілки ВАХ біполярної транзисторної структури VT1 – VT2 (2) та нормованої ВАХ діода VD1 (3)

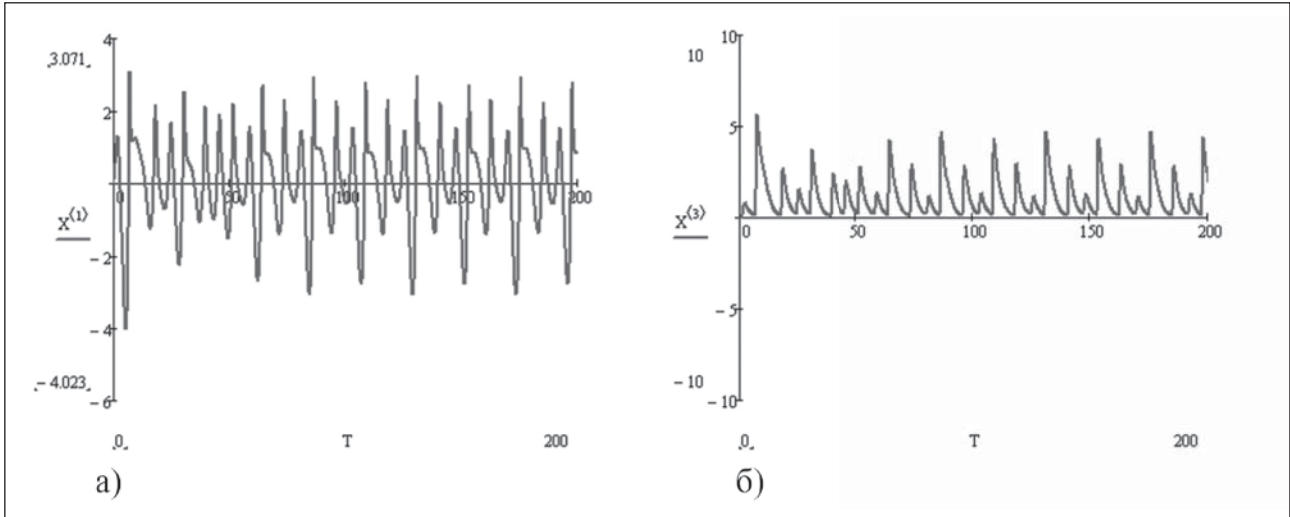


Рис. 4. Діаграми нормованих змінних x_1 (а) і x_3 (б) у безрозмірному часі $T=\omega_0\tau$

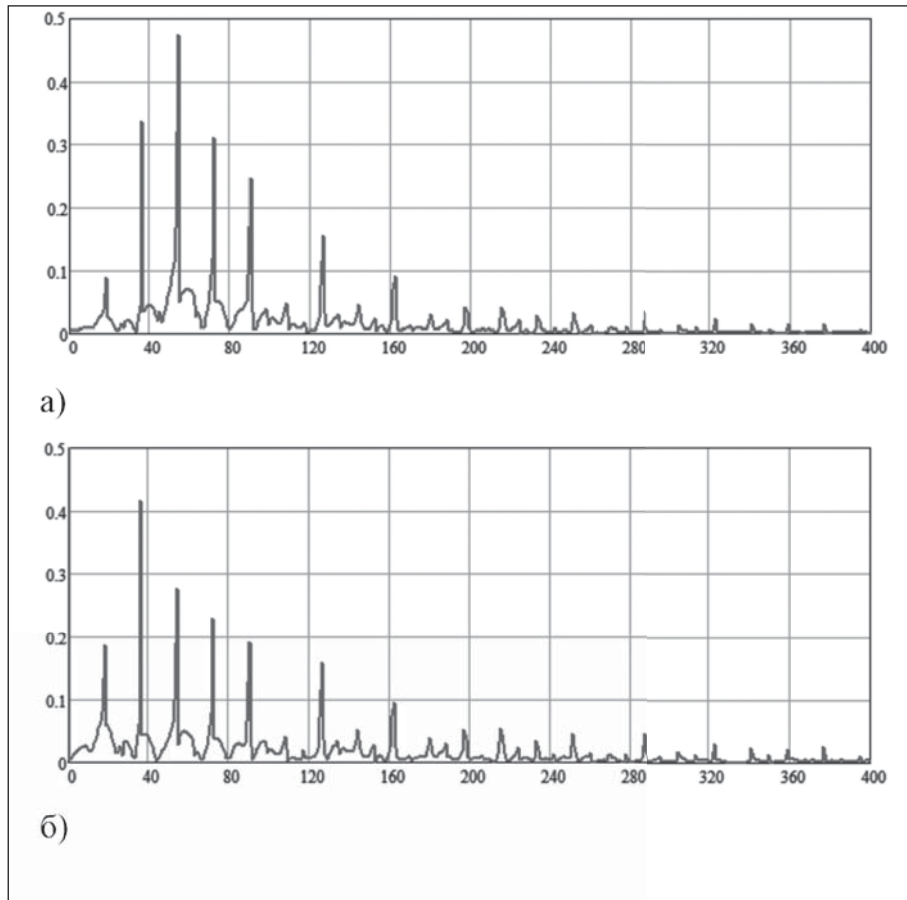


Рис. 5. Нормовані амплітудо-частотні спектри генерованих коливань динамічних змінних x_1 (а) і x_3 (б)

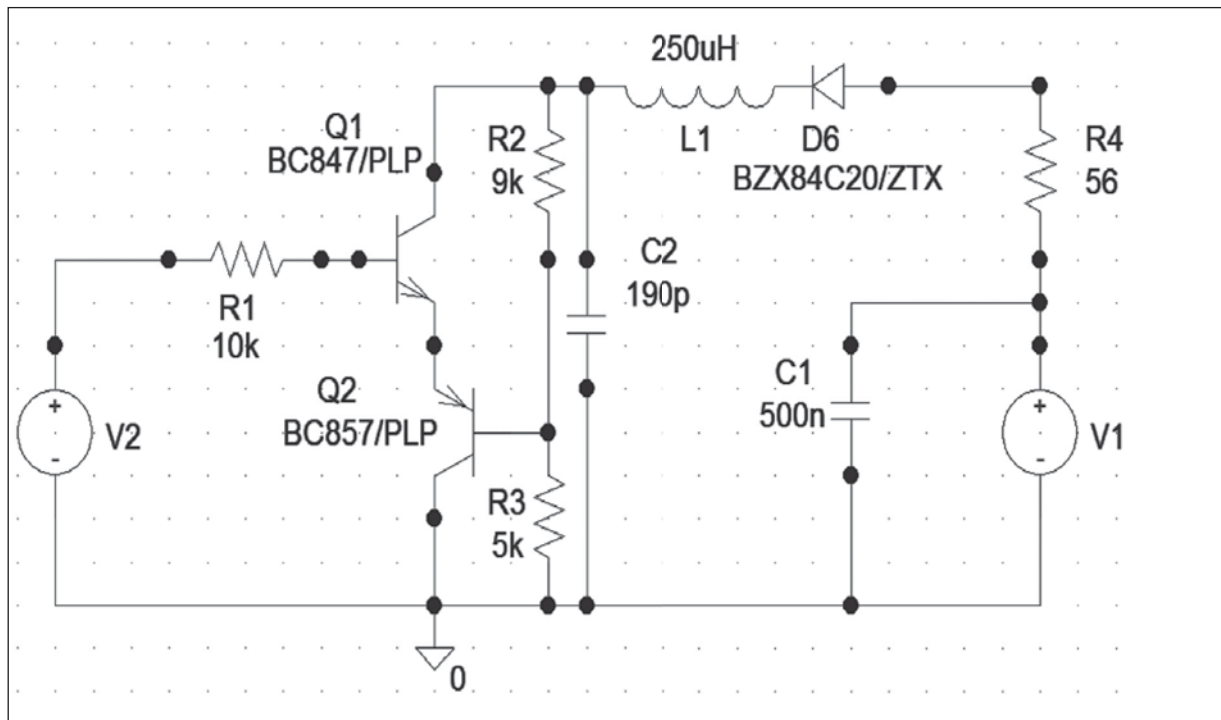


Рис. 6. Електрична схема генератора детермінованого хаосу в PSpiceOrcad 9.2

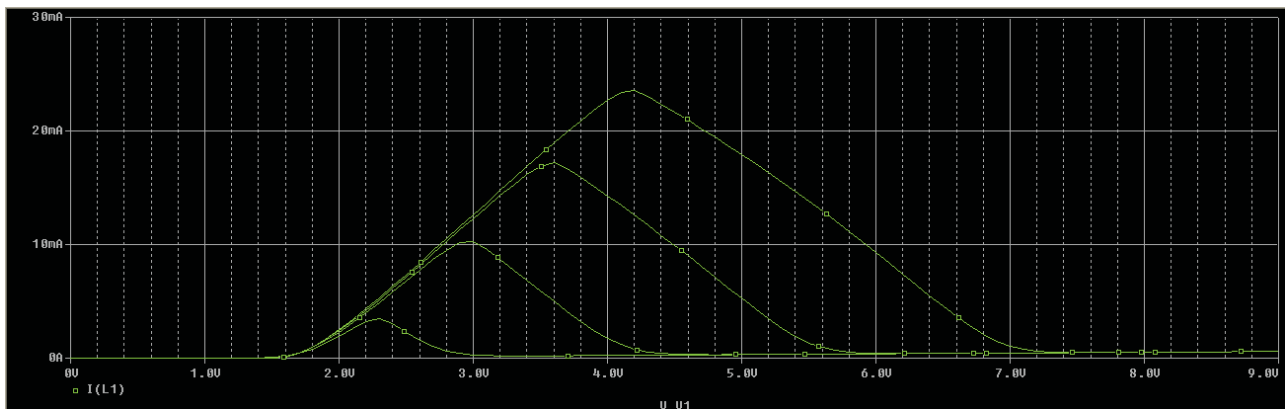


Рис. 7. Статичні вольт-амперні характеристики активного елемента генератора на основі біполярної транзисторної структури та діоду

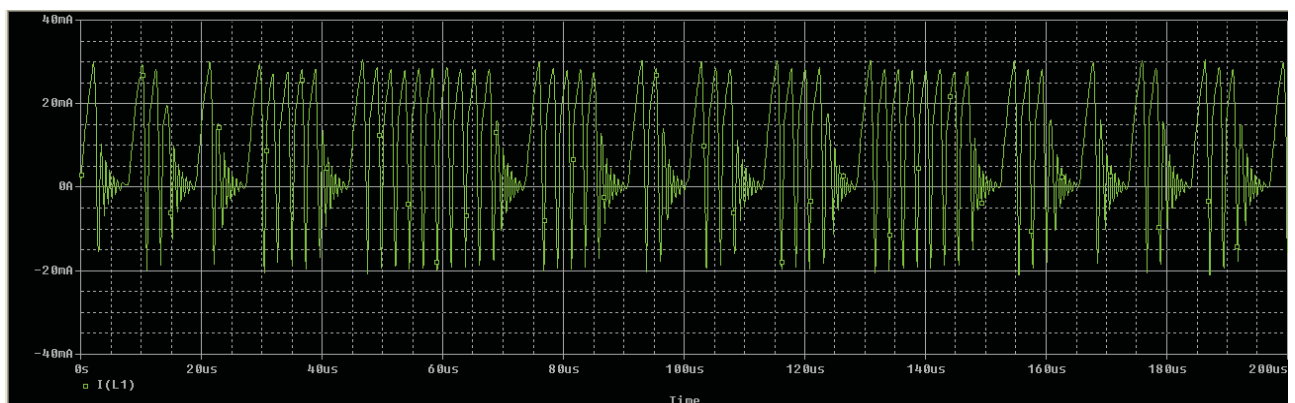


Рис. 8. Осцилограми коливань струму індуктивності L1

$$G(x_1) = 2.029 \cdot 10^{-3} x_1 + 1.114(1 - 1.002x_1) \tanh\left(\frac{25x_1}{1 - 1.002x_1}\right) \quad (2)$$

$$F(x_1) = 2.88 \cdot 10^{-6} x_1 + 2.074 \cdot 10^{-3} x_1^2 + 0.995 \cdot x_1^3 \quad (3)$$

$$I(x_1) = \begin{cases} 1, & x_1 > 0, \\ 0, & x_1 \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Графіки нормованої гілки ВАХ біполярної транзисторної структури VT1-VT2 і нормованої ВАХ діода VD1 показані на рис. 2.

Математичне моделювання системи нелінійних диференціальних рівнянь проведено в програмі MathCad 15.0 для таких коефіцієнтів: $m = 1,117$, $d = 0,01$, $g = 0,5$. Рішення системи диференціальних рівнянь здійснено методом Рунге-



Рис. 9. Осцилограми коливань напруги на конденсаторі C2

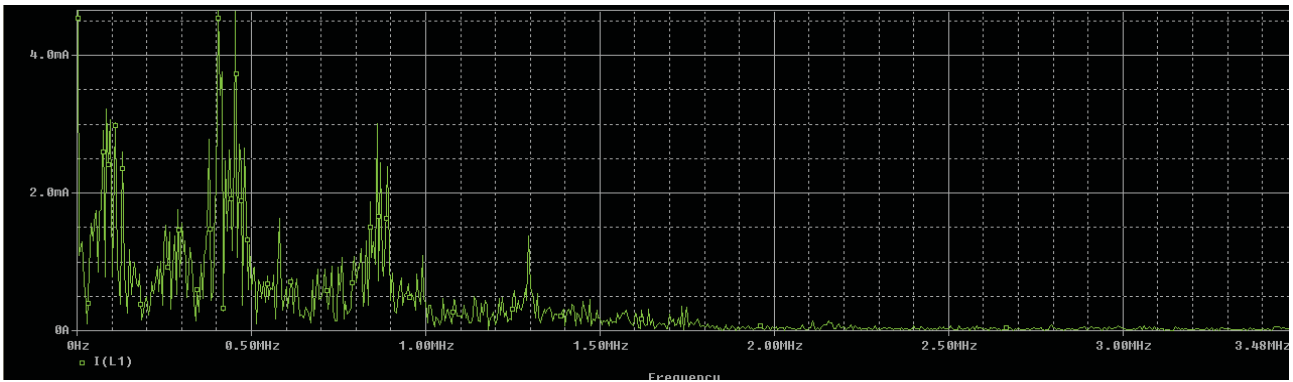


Рис. 10. Амплітудо-частотний спектр струму індуктивності L1

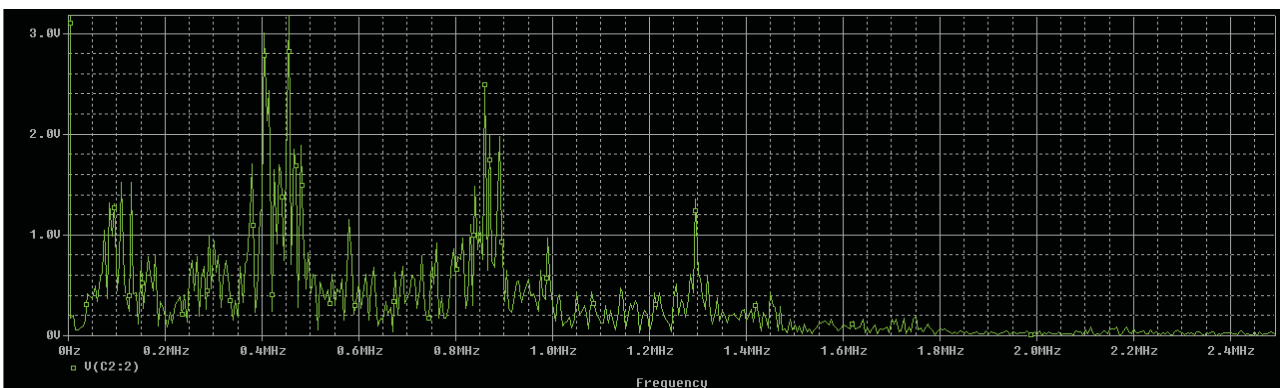


Рис. 11. Амплітудо-частотний спектр коливань напруги на конденсаторі C2

Кутта 4 порядку за допомогою стандартної функції $rkfixed()$. Результати моделювання хаотичного режиму генератора наведені на рис. 3 – рис. 5.

На рис. 16 разом із експериментально отриманим у [6] сімейством ВАХ біполярної транзисторної структури нанесено апроксимовані гілки ВАХ, які отримані за допомогою рівняння (2) з урахуванням масштабних коефіцієнтів при трьох значеннях напруги керування V_2 .

У дослідженні динамічних процесів увагу зосереджено на ємнісній та індуктивній складових частинах коливального контуру генератора детермінованого хаосу. Динамічна змінна x_1 пропорційна струму котушки індуктивності L_1 , а динамічна змінна x_3 пропорційна напрузі на конденсаторі C_2 .

Була розроблена PSpice модель схеми генератора в програмі Schematics пакету схмотехнічного моделювання Orcad 9.2, яка подана на рис. 6 [8]. Результати моделювання в PSpice Orcad 9.2 подані на рис. 7 – рис. 11.

Сімейство статичних вольт-амперних характеристик активного елементу генератора на основі біполярної транзисторної структури $Q_1 - Q_2$ та діоду D_6 наведено на рис. 7. На відміну від експериментальних ВАХ на рис. 16, вплив діоду полягає у зсуві на порогову напругу відкриття діоду, а вплив резистору – у зміні нахилу зростаючої вітки ВАХ (рис. 7).

Осцилограма електричних коливань струму індуктивності L_1 наведена на рис. 8. Осцилограма коливань напруги на конденсаторі C_2 наведена на рис. 9. Як видно з рис. 8 і рис. 9, електричні коли-

вання струму індуктивності та напруги на конденсаторі C_2 є пачками імпульсів. Тривалість пачок і кількість імпульсів у них визначаються параметрами коливального контуру генератора.

На рис. 10 і рис. 11 наведені амплітудо-частотні спектри відповідно струму індуктивності L_1 та напруги на конденсаторі C_2 . Обвідна спектральної щільності обох електричних коливань нерівномірна з яскраво вираженими спектральними складовими частинами основної частоти генерації та двох бічних частот.

Висновки. У роботі наведено та досліджено електричну схему генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Для аналітичних досліджень хаотичної динаміки генерованих електричних коливань використано математичну модель Аніщенко-Астахова, яку доповнено нелінійним рівнянням апроксимації статичної ВАХ біполярної транзисторної структури за допомогою функції гіперболічного тангенсу. Отримано фазові портрети генератора, часові та частотні діаграми генерованих електричних коливань. Правильність проведених розрахунків підтверджена результатами комп'ютерного схмотехнічного моделювання схеми генератора. Перевагами досліджуваного генератора є: 1) можливість реалізації за мікроелектронною технологією у вигляді мікросхеми; 2) можливість роботи в осциляторному, релаксаційному та хаотичному режимах; 3) електрична керованість режимами та параметрами генерованих коливань.

Список літератури:

1. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А. Генерация хаоса / под общ. ред. Дмитриева А.С. Москва: Техносфера, 2012. 424 с.
2. Шахтарин Б.И., Кобылкина П.И., Сидоркина Ю.А., Кондратьев А.В., Митин С.В. Генераторы хаотических колебаний: учеб. пособ. Москва: Гелиос АРВ, 2014. 248 с.
3. Elwakil A.S., Kennedy M.P. A low-voltage, low-power, chaotic oscillator, derived from a relaxation oscillator. *Microelectronics Journal*. 2000. № 31. P. 459–468.
4. Ferikoğlu A., Sarı Ya., Koker R. Design and Analysis of Negative Value Circuit Components in PSpice Simulation Software. *Computer Modelling and New Technologies*. 2013. Vol. 17. № 2. P. 53–59.
5. Van Ha Nguyen, Han Jung Song. Bifurcation Analysis of the Voltage Controlled Photosensitive Chaotic Oscillator. *CHIN. PHYS. LETT*. 2013. Vol. 30. № 6. P. 1–4.
6. Semenov A.O., Osadchuk O.V., Osadchuk Ya. 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: Conference Proceedings. (Erlagol, Altai, 30 June – 4 July 2016), Erlagol, 2016. P. 178–184.
7. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е. Генератор Анищенко-Астахова как одна из базовых моделей детерминированного хаоса. *Известия Саратовского университета. Серия «Физика»*. 2005. Т. 5. Вып. 1. С. 54–68.
8. Semenov A., Osadchuk O. Modeling the Deterministic Chaos Microelectronic Oscillator Based on the Bipolar Transistor Structure with Negative Resistance. 2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON): Conference Proceedings. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (May 29 – June 2, 2017, Kyiv, Ukraine), Kyiv, 2017. P. 704–708.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА
НА ОСНОВЕ БИПОЛЯРНОЙ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ
С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ**

В работе приведены результаты теоретических исследований и математического моделирования генератора детерминированного хаоса на основе биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Получила дальнейшее развитие математическая модель Анищенко-Астахова, которая является одной из базовых моделей теории детерминированного хаоса. Предложено уравнение аппроксимации статической ВАХ биполярной транзисторной структуры с помощью функции гиперболического тангенса. Исследована динамика генерируемых хаотических колебаний путем математического моделирования. Получены нормированные временные диаграммы и амплитудно-частотные спектры хаотических колебаний напряжения на конденсаторе и тока индуктивности.

Ключевые слова: генератор, детерминированный хаос, транзисторная структура, математическая модель, отрицательное сопротивление, фазовый портрет.

**RESEARCH OF THE DETERMINISTIC CHAOS OSCILLATOR BASED
ON A BIPOLAR TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE RESISTANCE**

The paper presents results of theoretical researching and mathematical modelling the deterministic chaos oscillator based on a bipolar structure with negative resistance. The Anishchenko-Astakhov mathematical model, one of the basic models of the deterministic chaos theory, was further developed. The equation for approximating the bipolar transistor structure static $I-V$ curve with a hyperbolic tangent function was proposed. Generated chaotic oscillation dynamics was studied by mathematical modelling. Normalized time diagrams and amplitude-frequency spectra for chaotic oscillations of a capacitor voltage and inductivity current were obtained.

Key words: oscillator, deterministic chaos, transistor structure, mathematical model, negative resistance, phase portrait.