

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 621.373.5

А. О. Семенов¹
О. В. Осадчук¹**ГЕНЕРАТОР ДИНАМІЧНОГО ХАОСУ З ІНЕРЦІЙНОЮ
НЕЛІНІЙНІСТЮ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНОЇ
ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**¹Вінницький національний технічний університет

Досліджено хаотичну динаміку електричних коливань генератора з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Показано, що хаотична динаміка електричних коливань у такому генераторі описується класичною математичною моделлю Аніщенко–Астахова. Запропоновано новий елемент моделі Аніщенко–Астахова у вигляді функції нелінійної апроксимації статичних ВАХ біполярної транзисторної структури. Отримано результати математичного моделювання та експериментальних досліджень хаотичної динаміки генерованих електричних коливань.

Ключові слова: генератор, хаос, транзисторна структура, від'ємний опір, інерційна нелінійність.

Вступ та постановка задач дослідження

Генератори динамічного хаосу широко використовуються в радіотехніці та телекомунікаціях [1—3]. Теорія радіоелектронних генераторів динамічного хаосу стрімко розвивається [4—6]. Відомо багато класичних схемних рішень радіоелектронних генераторів динамічного хаосу та їх математичних моделей [1—11]. Відповідно до способів побудови генератори електричних коливань поділяють на дві групи: 1) з використанням активних елементів з зовнішнім додатним зворотним зв'язком; 2) з використанням активних елементів з внутрішнім додатним зворотним зв'язком. Теорія генераторів електричних коливань, зокрема й генераторів динамічного хаосу, із зовнішнім додатним зворотним зв'язком добре відома, в той час як генераторам на основі приладів із внутрішнім додатним зворотним зв'язком приділено менше уваги.

Найбільшого поширення отримали транзисторні генератори динамічного хаосу за схемою Колпитця [7—11]. Вони працюють у широкому діапазоні частот від сотень кілогерців до 10 ГГц і вище [5, 6]. Їх основними перевагами є: 1) простота схеми та надійність роботи; 2) задовільні енергетичні характеристики, зокрема висока потужність хаотичних коливань і достатня рівномірність їх спектральної щільності [2, 5—8].

Однак транзисторні генератори динамічного хаосу за схемою Колпитця мають низку недоліків: 1) хаотичний режим забезпечується лише за певного співвідношення параметрів автоколивальної системи та є дуже чутливим до розкиду параметрів пасивних елементів і зміни напруги живлення [5, 6]; 2) параметри хаотичних коливань важко контролювати [9, 10]; 3) паразитні ємності колекторного та емітерного переходів біполярних транзисторів впливають на динаміку хаотичних процесів у діапазонах УВЧ та НВЧ [7]. Тому в таких генераторах застосовують додаткові схемні рішення для стабілізації хаотичного режиму та керування параметрами генерованих коливань. У роботах [8, 11] запропоновано змінні резистори для керування динамікою хаотичних коливань. У першому випадку відбувається обмеження струмового дзеркала, що регулює значення струму емітера біполярного транзистора [8]. У другому випадку змінний резистор підключений до вторинного кола трансформатора зв'язку з навантаженням. Зміна значення цього резистора викликає зміну еквівалентної індуктивності коливального контуру [11], що зумовлює переналаштування параметрів генерованих нелінійних і хаотичних коливань.

Актуальною науково-технічною задачею є розвиток теорії та практики генераторів динамічного хаосу на основі приладів з від'ємним опором [6].

Метою роботи є дослідження хаотичної динаміки електричних коливань генератора з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором.

Для досягнення мети у роботі необхідно: 1) розробити схему генератора динамічного хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором; 2) обґрунтувати математичну модель генератора та отримати результати теоретичних досліджень; 3) провести експериментальні дослідження та порівняти результати з теоретично отриманими.

Розв'язання поставлених задач

Простим способом отримання хаотичної динаміки коливань є додавання до базової схеми синусоїдального генератора електричного кола, що складається з послідовно з'єднаних діода, резистора та котушки індуктивності [12, 13]. 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 зміщенні [12].

Електрична схема генератора динамічного хаосу, запропонована авторами у [14], показана на рис. 1. Вона складається з базової схеми генератора електричних коливань на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором та додаткового кола з послідовно з'єднаних діода й резистора, включених у вітку індуктивності [14].

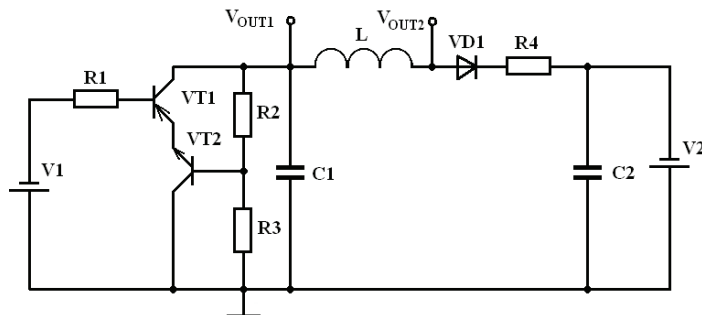


Рис. 1. Електрична схема генератора динамічного хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором

Активний елемент генератора на біполярних транзисторах VT1, VT2 має сімейство Λ -подібних вольт-амперних характеристик. Паралельно активному елементу генератора підключений конденсатор C1 для зменшення впливу амплітуди генерованих коливань на величину ємнісної складової реактивного опору транзисторної структури VT1—VT2. Конденсатор C2 блокує джерело напруги живлення V2 від протікання змінного струму. Коливальний контур генератора

складається з котушки індуктивності L та ємнісного елемента у вигляді реактивної складової опору транзисторної структури VT1—VT2 з паралельно підключеним конденсатором C1. Резистор R1 обмежує струм бази транзистора VT1. Наявність в індуктивній вітці коливального контуру діода VD1, послідовно включеного з резистором R4, приводить до виникнення хаотичних коливань у генераторі.

Для проведення експериментальних досліджень авторами створено дослідний макет. Застосовано такі радіоелементи в схемі на рис. 1: VT1 — КТ363БМ, VT2 — КТ368А, VD1 — КД522, $L = 250$ мкГн, $R1 = 9,1$ кОм, $R2 = 560$ Ом, $R3 = 5,1$ кОм, $R4 = 56$ Ом, $C1 = 3,3$ нФ, $C2 = 2,0$ мкФ. На рис. 2 показано експериментально отримане сімейство статичних ВАХ активного елемента генератора на біполярних транзисторах VT1—VT2 (розмах віток ВАХ: по осі абсцис — 12 В, по осі ординат — 30 мА).

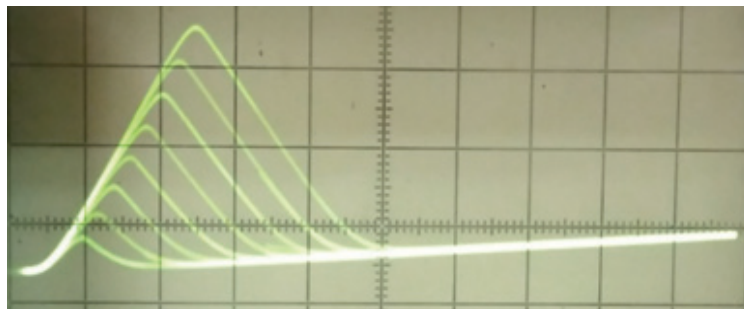


Рис. 2. Сімейство статичних ВАХ біполярної транзисторної структури VT1—VT2

У [14] авторами обґрунтовано, що для опису динамічних процесів у схемі генератора динамічного хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором доцільно використати модифікацію математичної моделі Аніщенко–Астахова [15], яка в нормованому часі

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

та нормованих змінних має вигляд

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

де $F(x_1)$ — нормована функція апроксимації статичної ВАХ напівпровідникового 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; ω_0 — частота стаціонарних періодичних коливань генератора; m — параметр автоколивальної системи, який пропорційний різниці внесеної в коливальний контур та розсіяної енергії ($m = 0,6 \dots 1,2$); g — параметр автоколивальної системи, який пропорційний відносному часу релаксації інерційного елемента ($g = 0,1 \dots 0,9$); d — малий параметр, який відповідає ступеню впливу нелінійності крутизни ВАХ транзисторної структури ($d = 0,1 \dots 0,2$) [15]. Рівняння нормованих функцій мають вигляд [14]

$$F(x_1) = 2,88 \cdot 10^{-6} x_1 + 2,074 \cdot 10^{-3} x_1^2 + 0,995 \cdot x_1^3; \quad (3)$$

$$G(x_1) = 2,029 \cdot 10^{-3} x_1 + 1,114(1 - 1,002x_1) \tanh\left(\frac{25x_1}{1 - 1,002x_1}\right); \quad (4)$$

$$I(x_1) = \begin{cases} 1, & x_1 > 0; \\ 0, & x_1 \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Математичне моделювання динамічних процесів у генераторі на основі системи диференціальних рівнянь (2) з урахуванням рівнянь (3)—(5) у нормованому часі (1) виконано в програмі MathCad 15.0 з такими коефіцієнтами: $m = 1,117$, $d = 0,01$, $g = 2,0$ [16]. Система диференціальних рівнянь була розв'язана за допомогою методу Рунге–Кутта 4-го порядку з використанням стандартної функції *rkfixed* () [14, 16]. Результати моделювання хаотичного режиму генератора показані на рис. 3—7.

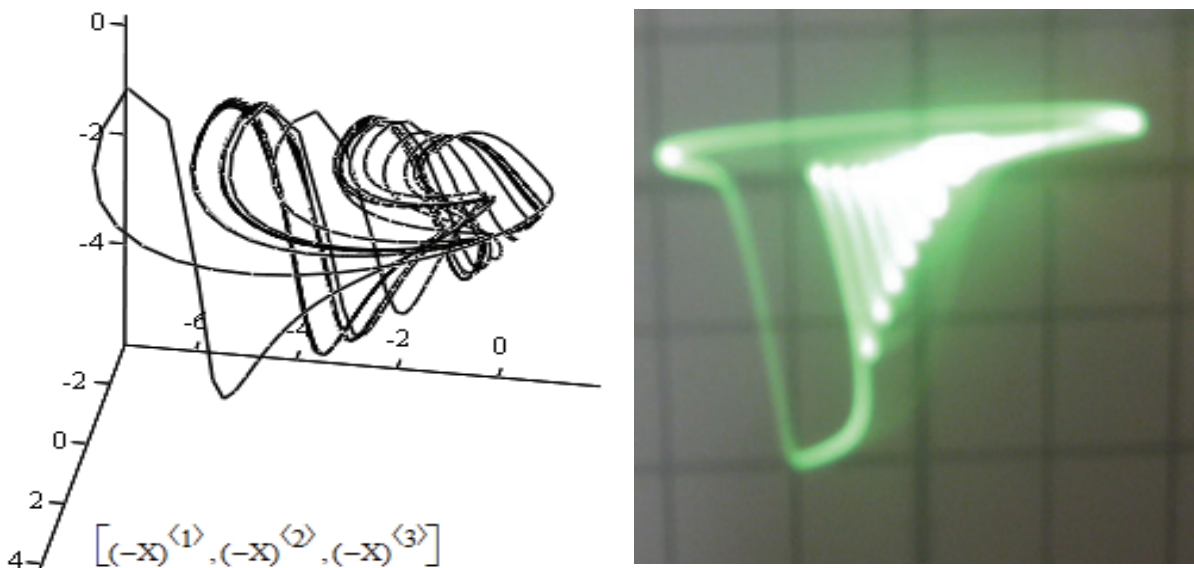


Рис. 3. Фазові портрети генератора детермінованого хаосу в просторі нормованих змінних $x_1, -x_2, -x_3$: а — розрахунковий; б — експериментальний

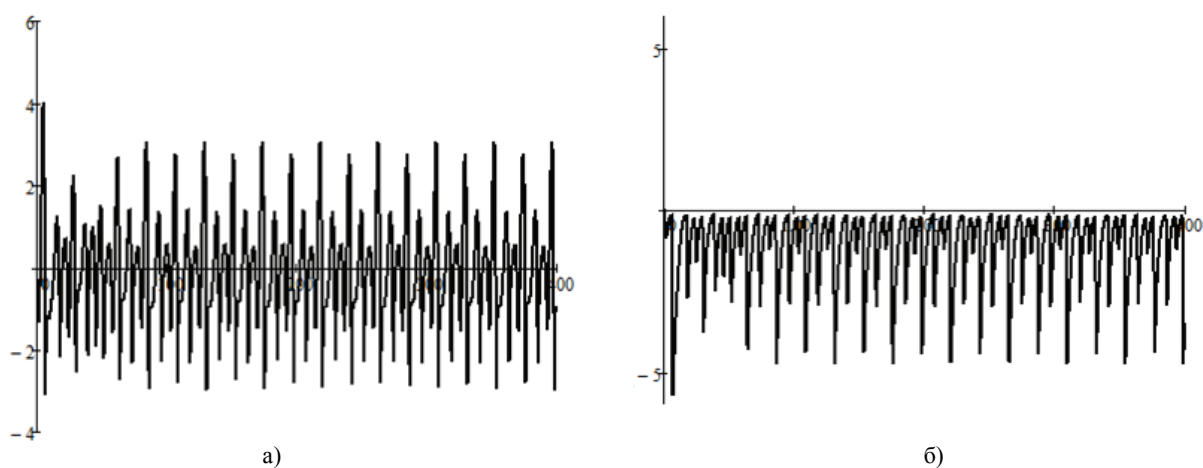


Рис. 4. Діаграми залежності нормованих змінних відносно нормованого часу (1): а — x_1 ; б — x_3

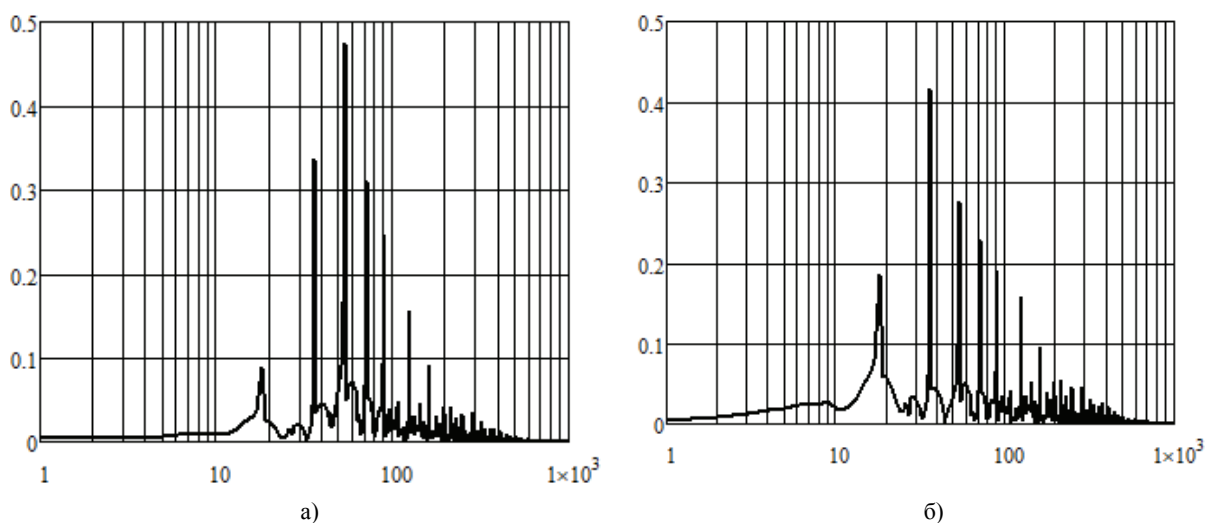


Рис. 5. Амплітудо-частотні спектри нормованих змінних: а — x_1 ; б — x_3
(вісь абсцис нормована до частоти ω_0)

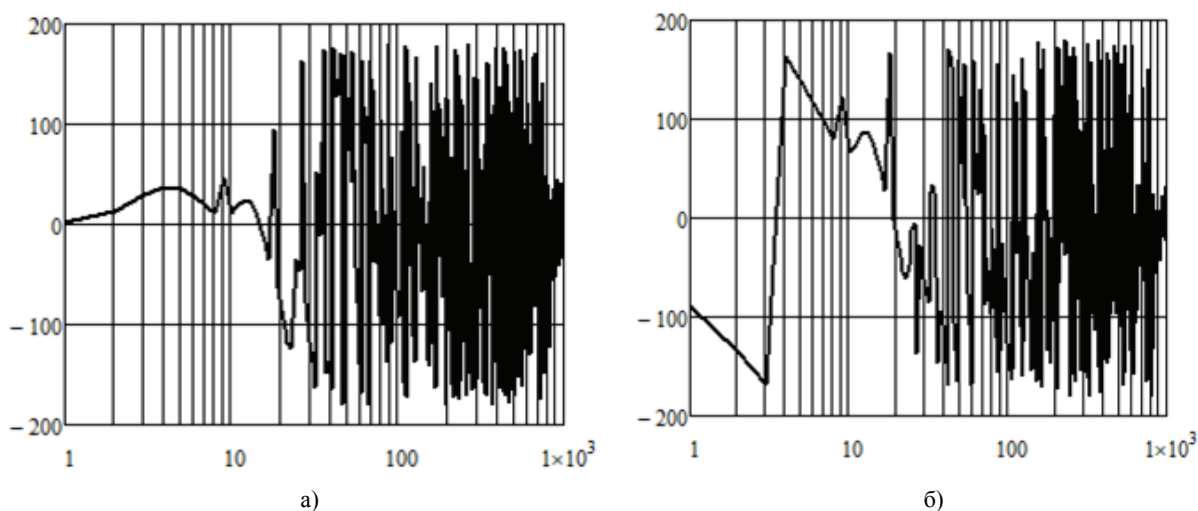


Рис. 6. Фазочастотні спектри (в градусах) нормованих змінних: а — x_1 ; б — x_3
(вісь абсцис нормована до частоти ω_0)

На рис. 7 показано осцилограми генерованих хаотичних напруг V_{OUT1} і V_{OUT2} . Зовнішня схожість фазових портретів — розрахункового (рис. 3а) та експериментального (рис. 3б), а також функцій часу генерованих коливань — розрахункових (рис. 4) та експериментальних (рис. 7), підтверджує адекватність модифікованої математичної моделі Аніщенко–Астахова.

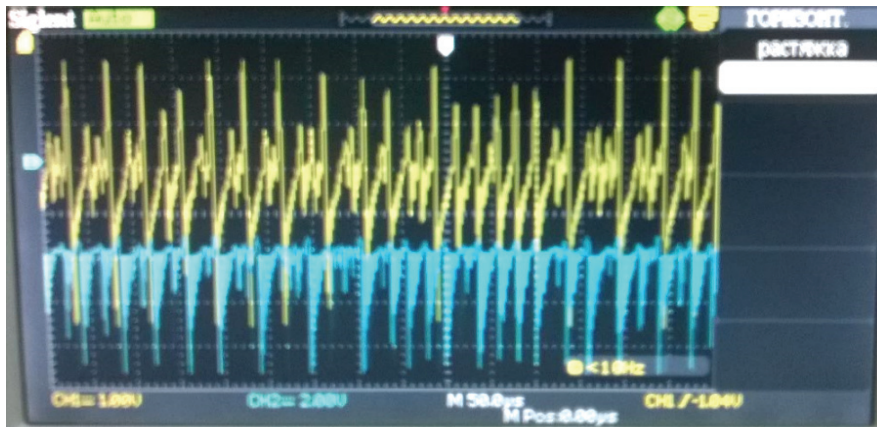


Рис. 7. Осцилограми генерованих хаотичних напруг V_{OUT1} і V_{OUT2} (нормовані змінні x_1 та x_3)

Висновки

Досліджено хаотичну динаміку електричних коливань генератора з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Отримала подальший розвиток математична модель Аніщенко–Астахова. Авторами модифіковано математичну модель Аніщенко–Астахова та запропоновано новий елемент моделі у вигляді нормованої функції нелінійної апроксимації статичних ВАХ біполярної транзисторної структури за допомогою гіперболічного тангенса. З'ясовано, що використання транзисторної структури з сімейством ВАХ Λ -типу розширює фазовий простір генерованих хаотичних коливань у нормованих змінних. Для класичної математичної моделі Аніщенко–Астахова з $d = 0,1 \dots 0,2$ хаотичний режим забезпечений з коефіцієнтами $m = 0,72 \dots 1,2$ і $g = 0,13 \dots 0,9$. Для запропонованої автоколивальної системи з $d = 0,1$ хаотичний режим забезпечений за коефіцієнтів $m = 0,07 \dots 1,7$ і $g = 0,4 \dots 3,4$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дмитриев А. С. Динамический хаос : Новые носители информации для систем связи / А. С. Дмитриев, А. И. Панас. — М. : Физматлит, 2002. — 251 с.
2. Kennedy M. P. Chaotic Electronics in Telecommunications / M. P. Kennedy, R. Rovatti, G. Setti. — London : CRC Press, 2000. — 442 с.
3. Залогин Н. Н. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах / Н. Н. Залогин, В. В. Кислов. — М. : Радиотехника, 2006. — 205 с.
4. Anishchenko V. S. Deterministic Nonlinear Systems. A Short Course. Springer International Publishing / Vadim S. Anishchenko, Tatyana E. Vadivasova, Galina I. Strelkova. — Switzerland, 2014.
5. Шахтарин Б. И. Генераторы хаотических колебаний : учебн. пос. / [Б. И. Шахтарин, П. И. Кобылкина, Ю. А. Сидоркина и др.]. — М. : Гелиос АРВ, 2014. — 248 с.
6. Генерация хаоса / [А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, Н. А. Максимов, А. И. Панас] ; под общ. ред. А. С. Дмитриева. — М. : Техносфера, 2012. — 424 с.
7. Tsakiridis O. Chaotic Operation of a Colpitts Oscillator in the Presence of Parasitic Capacitances / O. Tsakiridis, D. Syvridis, E. Zervas, J. Stonham // WSEAS Transactions on Electronics. — Vol. 1, Apr. 2004. — Pp. 416—421.
8. Suvra Sarkar. Dynamics of Driven Colpitts Oscillator in Presence of Co-channel Tone Interference: An Experimental Study / Suvra Sarkar, Sandeepa Sarkar, B. C. Sarkar // International Journal of Electronics and Applied Research (IJEAR) 2014. No. 1. Published Online, June 2014. — Pp. 1—14.
9. Hyperchaos in coupled Colpitts oscillators / [Antanas Cenys, Arunas Tamasevicius, Antanas Baziliauskas and other] // Journal Chaos, Solitons and Fractals. — 2003. — Vol. 17. — Pp. 349—353.
10. Guo Hui Li. Controlling chaos in Colpitts oscillator / Guo Hui Li, Shi Ping Zhou, Kui Yang // Chaos, Solitons and Fractals. — 2007. — Vol. 33. — Pp. 582—587.
11. Chaos Control in Inductor-Based Chaotic Oscillators / Arturo Buscarino, Luigi Fortuna, Mattia Frasca, Gregorio Sciuto // Proceedings of the 19th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems — MTNS, 5—9 July 2010, Budapest, Hungary. — 2010. — Pp. 2207—2210.
12. Kucheruk V. RL-diode generator of chaotic oscillations as resistance – voltage converter | [Generator oscylacji chaotycznych o układzie RL-dioda jako przetwornik rezystancja – napięcie] / [Volodymyr Kucheruk, Zygmunt L. Warsza, Volodymyr Sevastyanov, Wiktoria Mankowska] // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 89 NR 10/2013, 2013. — Pp. 266—269.
13. Deterministic chaos in RL-diode circuits and its application in metrology / [Volodymyr Kucheruk, Samuil Katsyv, Mykhailo Glushko and other] // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. Proceedings Volume 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016; 100312A (2016); doi: 10.1117/12.2249253 Event: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, Wilga, Poland, 2016. — Pp. 1—8.
14. The Chaos Oscillator with Inertial Non-Linearity Based on a Transistor Structure with Negative Resistance / [Andriy O. Semenov, Alexander V. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk and other] // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016, Erlagol, Altai. — 30 June—4 July, 2016: Conference Proceedings,

2016. — P. 178—184. doi: 10.1109/EDM.2016.7538720.

15. Анищенко В. С. Генератор Анищенко-Астахова как одна из базовых моделей детерминированного хаоса / Анищенко В. С., В. В. Астахов, Т. Е. Вадивасова // Известия Саратовского университета. — 2005. — Т. 5., вып. 1. — С. 54—68. — (Физика).

16. Семенов А. О. Хаотична автоколивальна система з кубічною інерційною нелінійністю на основі приладу з від'ємним опором / Семенов А. О. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2016. — № 3 (56). — С. 77—81.

Рекомендована кафедрою радіотехніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.11.2017

Семенов Андрій Олександрович — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри радіотехніки, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua ;

Осадчук Олександр Володимирович — докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

A. O. Semenov¹
O. V. Osadchuk¹

Deterministic Chaos Oscillator with Inertial Non-Linearity Based on a Bipolar Transistor Structure with Negative Resistance

¹Vinnitsia National Technical University

Chaotic dynamics of electrical oscillations in the oscillator having inertial non-linearity and based on transistor structure with negative resistance has been examined in this paper. Chaotic dynamics of electrical oscillation in the oscillator was shown as being described with the Anishchenko–Astakhov classical model. New element of the Anishchenko–Astakhov model as a function of a bipolar transistor structure static I-V curves non-linear approximation has been suggested. Results of the electrical oscillation chaotic dynamics mathematical modelling and experimental research have been obtained.

Keywords: oscillator, chaos, transistor structure, negative resistance, inertial non-linearity.

Semenov Andrii O. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Doctoral Student of the Chair of Radio-Frequency Engineering, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua ;

Osadchuk Oleksandr V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Radio-Frequency Engineering, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

A. A. Семёнов¹
A. B. Осадчук¹

Генератор детерминированного хаоса с инерционной нелинейностью на основе биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением

¹Винницкий национальный технический университет

Исследовано хаотическую динамику электрических колебаний генератора с инерционной нелинейностью на основе биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Показано, что хаотическая динамика электрических колебаний в таком генераторе описывается классической математической моделью Анищенко–Астахова. Предложен новый элемент модели Анищенко–Астахова в виде функции нелинейной аппроксимации статических ВАХ биполярной транзисторной структуры. Получены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований хаотической динамики генерированных электрических колебаний.

Ключевые слова: генератор, хаос, транзисторная структура, отрицательное сопротивление, инерционная нелинейность.

Семёнов Андрей Александрович — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры радиотехники, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua ;

Осадчук Александр Владимирович — докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com