

ГЕНЕРАТОР ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ КИЯШКО-ПІКОВСЬКОГО-РАБІНОВИЧА НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНОЇ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

На сьогоднішній день у всьому світі ведуться інтенсивні дослідження електронних генераторів детермінованого хаосу. Актуальною науковою задачею є розробка простої схеми для генерування складних неперіодичних коливань з електричним регулюванням. Розроблено багато хаотичних генераторів, а їхня динаміка досліджена для вирішення цього завдання. Найпоширеніші хаотичні генератори побудовані на інтегральних схемах та операційних підсилювачах. Широко досліджуються удосконалення та модифікації генератору Чуа. Однак деякі дослідники звертають увагу на схеми транзисторних генераторів, здатних генерувати хаотичні коливання. Класична схема Кіяшка-Піковського-Рабіновича (КПР) є найпростішим генератором детермінованого хаосу і була запропонована в 1978 році. Він являє собою ламповий генератор Ван-дер-Поля і має коливальний контур в колі сітки. Для виникнення нелінійних коливань в коло сітки підключений тунельний діод.

Режими роботи та динамічні процеси в такому генераторі добре відомі. Недоліками генератора є: 1) неможливе інтегральне виконання конструкції внаслідок застосування тунельного діоду; 2) електричне керування параметрами хаотичних коливань ускладнюється внаслідок фіксованих статичних вольт-амперних характеристик тунельного діоду. Ці недоліки генератора КПР можуть бути усунуті властивостями електричних характеристик біполярної транзисторної структури з від'ємним опором.

Класична математична модель хаотичного генератора КПР має такі недоліки: 1) не врахована зміна ємності $C(U)$ від амплітуди напруги біполярної транзисторної структури з від'ємним опором; 2) не враховано вплив нелінійних характеристик підсилювача на біполярному транзисторі VT3. А тому класичний осцилятор КПР має малу динаміку хаотичних коливань.

У роботі отримала подальший розвиток класична схема генератора детермінованого хаосу Кіяшка-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Досліджено динамічні процеси хаотичних коливань в генераторі з використанням удосконаленої моделі. Також були отримані фазові портрети генератору в різних режимах роботи.

Розглянуто способи управління режимами хаотичних коливань генератору. Теоретично отримано фазові портрети генератору, а також часові та частотні характеристики хаотичних коливань. Запропоновано модифікацію генератору КПР на біполярній транзисторній структурі з від'ємним опором. Показано, що динаміка хаотичних коливань в генераторі описується математичною моделлю Кіяшка-Піковського-Рабіновича. Математична модель осцилятора КПР здійснює опис динамічних процесів в генераторі на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором з вольт-амперною характеристикою Λ -типу. Математичне моделювання динамічної системи КПР здійснювалося за допомогою програми **Mathcad 15.0**. Система диференціальних рівнянь вирішена шляхом застосування методу Рунге-Кутти 4-го порядку за допомогою стандартної функції **rkfixed()**. Отримано фазові портрети, часові та частотні характеристики коливань.

Ключові слова – хаотичний генератор; математична модель; від'ємний опір; транзисторна структура; генератор КПР; фазові портрети.

А.О. СЕМЕНОВ

Vinnytsia National Technical University

THE DETERMINISTIC CHAOS OSCILLATOR OF KIYASHKO-PIKOVSKII-RABINOVICH BASED ON A BIPOLAR TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE RESISTANCE

At present electrical oscillators of deterministic chaos are researched intensively all over the world. A substantial scientific task is developing a simple electric circuit for complex non-periodic oscillation generating with parametric control. A great deal of chaotic oscillator circuits have been designed and their dynamics has been examined to solve this task. The chaotic oscillators built on integrated circuits and operational amplifiers are the most widespread. Improvement and modification of the Chua oscillator are researched intensively. However, some researchers pay attention to transistor oscillator circuits able to generate chaotic oscillation. But, the classical Kiyashko-Pikovskiy-Rabinovich (KPR) circuit is the simplest deterministic chaos oscillator and was proposed in 1978. It resembles the Van-der-Pol oscillator and has an oscillatory network in a grid circuit. For non-linear oscillating a tunnel-effect diode is connected at the grid circuit.

Operating modes in this oscillator and dynamic processes are well-known. The drawbacks of the oscillator are: 1) integrated construction is impossible because of tunnel-effect diode application; 2) voltage-control of chaotic oscillation parameters is complicated due to fixed static volt-ampere characteristics of the tunnel-effect diode. These drawbacks of the KPR oscillator have been removed by electrical characteristics of a bipolar transistor structure with negative resistance.

The chaotic KPR oscillator classical mathematical model has some drawbacks: 1) change of capacitance $C(U)$ because of a voltage amplitude of the bipolar transistor structure with negative resistance was not considered; 2) influence of the amplifier's non-linear characteristics on the bipolar transistor VT3 was not considered. That is why the classical KPR oscillator possesses a low dynamics of chaotic oscillation.

This paper suggests a further development for the classical circuit of the Kiyashko-Pikovskiy-Rabinovich deterministic chaos oscillator, that is based on the bipolar transistor structure with negative resistance. The chaotic oscillation dynamic processes in the oscillator have been investigated applying the improved model. Also, oscillator phase portraits in various operating modes have been retrieved.

Ways of controlling the chaotic oscillation mode in the oscillators have been examined. Phase portraits of the oscillators as well as frequency and time relation of chaotic oscillation have been obtained theoretically. Modification of the KPR oscillator on the bipolar transistor structure with negative resistance has been suggested. It was shown that chaotic oscillation dynamics in the oscillator is described

with the Kiyashko-Pikovskiy-Rabinovich mathematical model. The KPR oscillator mathematical model facilitates dynamic processes description in the oscillator based on the bipolar transistor structure with negative resistance and with volt-ampere characteristic of Λ -type. Mathematical modelling the KPR dynamic system has been carried out with Mathcad 15.0 program. The differential equations system has been solved by applying the 4-th order Runge-Kutta method with a standard function of `rkfixed()`. Phase portraits, spectral and time diagrams of chaotic oscillations have been obtained.

Keywords – chaotic oscillator; mathematical model; negative resistance; transistor structure; KPR oscillator; phase portraits.

Вступ

У теперішній час в умовах швидкого розвитку інформаційних технологій і вдосконалювання технічних засобів обробки сигналів, а також передавання та зберігання даних, основним науково-технічним завданням є забезпечення конфіденційності при передачі інформації [1, 2]. Одним із способів рішення цієї задачі є використання сигналів детермінованого хаосу, яким притаманні такі властивості [3, 4]: 1) вони складні та широкосмугові; 2) мають високу інформаційну ємність; 3) вони ортогональні, оскільки їхня автокореляційна функція швидко затухає у часі; 4) мають високу стійкість до адитивного білого Гаусівського шуму.

На сьогоднішній день відомо безліч математичних моделей автоколивальних систем і схемних рішень їх практичної реалізації [5]. Для прикладного застосування досягнень теорії нелінійних коливань у радіотехніці та телекомунікаціях найбільшого поширення отримали транзисторні генератори детермінованого хаосу, які є найбільш високочастотними [6, 7]. Тому розвиток теорії та створення транзисторних генераторів детермінованого хаосу є актуальною науково-технічною задачею. При цьому, перспективним напрямком побудови генераторів детермінованого хаосу є використання нелінійних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.

Метою даної роботи є удосконалення математичної моделі генератора детермінованого хаосу Кияшка-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Основна увага при цьому приділяється дослідженню динаміки генерованих коливань у різних режимах роботи. Об'єктом дослідження є процеси генерування та формування сигналів детермінованого хаосу в генераторі детермінованого хаосу Кияшка-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Предметом дослідження є фазові портрети генератора детермінованого хаосу Кияшка-Піковського-Рабіновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором.

Електрична схема генератора детермінованого хаосу

Класична структура генератора КПР запропонована в 1978 році [8]. На рис. 1 подана електрична схема генератора детермінованого хаосу КПР, у якому замість автогенератора з трансформаторним зворотним зв'язком [9] використано схему ємнісної триточки [10], а замість тунельного діоду застосовано біполярну транзисторну структуру з від'ємним опором.

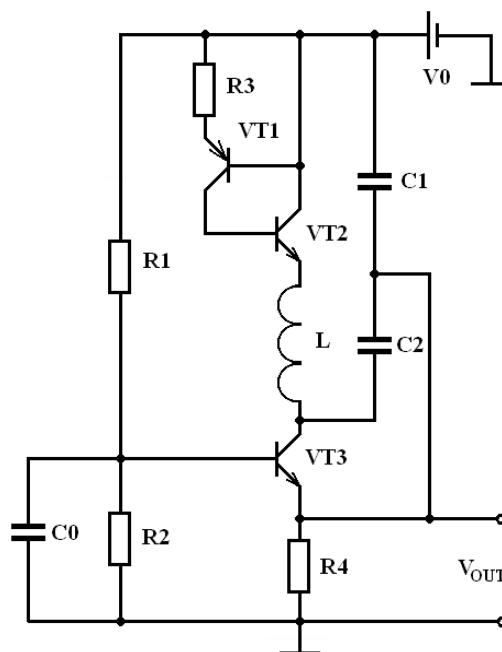


Рис. 1. Електрична схема генератора детермінованого хаосу з двотранзисторним активним елементом

Схема генератора детермінованого хаосу Кияшка-Піковського-Рабіновича на рис. 1 являє собою генератор Колпитця на біполярному транзисторі VT3 і має коливальну систему, яка складається з котушки індуктивності L і конденсаторів C1-C2. Для розвинення динаміки хаотичних коливань в колекторне коло біполярного транзистору VT3, яке містить котушку індуктивності L, включено транзисторну структуру VT1-VT2, що має статичну ВАХ Λ -типу. Зміна величини напруги живлення приводить до зміни положення робочої точки на статичній ВАХ Λ -типу. Управління режимами генерації здійснюється як зміною

від'ємного диференціального опору транзисторної структури VT1–VT2, так і зміною глибини додатного зворотного зв'язку автогенератора на основі біполярного транзистора VT3 [12].

У роботі [10] розглянуто методи реалізації керування хаосом в аналогових генераторах. Основні методи керування хаосом у генераторах пов'язані зі зміною параметрів або режимів наявної в схемі нелінійності, що і дає можливість одержання хаотичного режиму [10]. Виділено три методи керування хаосом в аналогових генераторах [10]:

- зміна режиму роботи елементів схеми;
- зміна параметрів елементів або вузлів схеми;
- зміна нелінійної характеристики вузла схеми, який використовується як нелінійний елемент.

Автором розглянута можливість генерації хаотичних коливань за рахунок зміни величини активної складової повного опору транзисторної структури VT1–VT2. Це можна здійснити двома способами: 1) електричним (шляхом зміни напруги живлення), 2) механічним (при використанні змінного резистора як R3). Зміна ж реактивної складової повного опору транзисторної структури колектор VT1 – колектор VT2, що має ємнісний характер, у цьому випадку має другорядну функцію [11].

Основна частота генерації коливань може бути визначена як [12]

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} . \quad (1)$$

Математична модель генератора

Динаміка генератора детермінованого хаосу КНР описується системою звичайних диференціальних рівнянь у нормованих змінних відносно нормованого часу

$$\dot{t} = w_0 t , \quad (2)$$

на основі скороченої системи рівнянь рівноваги за законами Кірхгофа [12, 13]

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = 2hx_1 + x_2 - gx_3, \\ \frac{dx_2}{dt} = -x_1, \\ e \frac{dx_3}{dt} = x_1 - f(x_3). \end{cases} \quad (3)$$

де рівняння нормованих змінних [12, 13]

$$x_1 = \frac{I}{I_m}, \quad x_2 = UI_m \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad x_3 = \frac{V}{V_m} \quad (4)$$

і коефіцієнтів рівнянь системи [12, 13]

$$2h = R\sqrt{\frac{C}{L}}, \quad g = \frac{V_m}{I_m} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad e = \frac{gC(V)}{C}, \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad (5)$$

I_m, V_m - параметри апроксимації статичної ВАХ транзисторної структури VT1-VT2.

Рівняння апроксимації статичної ВАХ Λ -типу транзисторної структури VT1-VT2 має вигляд

$$f(x_3) = -1.143 \cdot 10^{-3} + 6.972x_3 - 14.382x_3^2 + 7.439x_3^3. \quad (6)$$

На рис. 2 наведено побудований в MathCad 15.0 нормований графік апроксимації статичної ВАХ Λ -типу транзисторної структури VT1-VT2 за допомогою кубічного поліному (6).

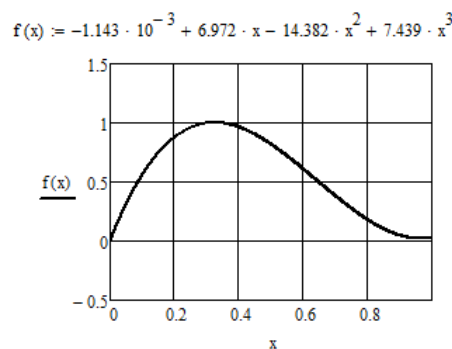


Рис. 2. Графік нормованої функції апроксимації статичної ВАХ біполярної транзисторної структури з від'ємним опором Λ -типу

Основним недоліком класичної математичної моделі хаотичного генератора Кияшка-Піковського-Рабіновича є те, що не враховані нелінійні властивості прохідної ВАХ підсилювального елемента VT3 [13]. Вплив нелінійних властивостей статичної ВАХ біполярного транзистору VT3 приведе до зміни першого

диференціального рівняння системи (3) до вигляду [13]

$$\frac{dx_1}{dt} = 2hx_1 + x_2 - gx_3 + dx_1 \cdot x_2^2 \quad (7)$$

де

$$d = \frac{V_m}{U_0} \sqrt{\frac{S}{w_0 C_1}}, \quad (8)$$

S - крутизна статичної ВАХ біполярного транзистора VT3.

Результати математичного моделювання

Подальші дослідження динамічних процесів у генераторі детермінованого хаосу Кияшка-Піковського-Рабіновича проведено автором на підставі математичної моделі (3) з урахуванням рівнянь (4)-(8). Усі обчислення та графіки отримано автором за допомогою стандартної функції *rkfixed()* пакету програм MathCad 15.0 [14].

Режим квазігармонічних коливань генератору КПП з нелінійністю Λ -типу має місце при таких параметрах автоколивальної системи: $\varepsilon=0,2$ і $h=0,07$, $g=0,957$ (рис. 3 – рис. 5).

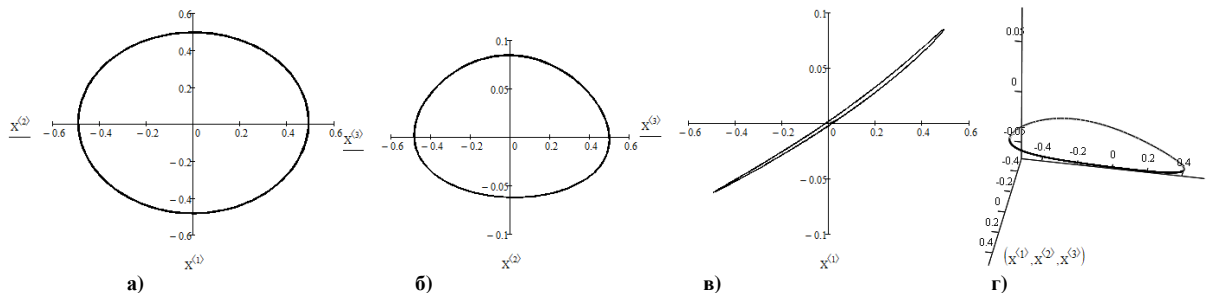


Рис. 3. Фазові портрети генератору КПП з нелінійністю Λ -типу в квазігармонічному режимі у площинах змінних x_1 - x_2 (а), x_2 - x_3 (б), x_1 - x_3 (в) і просторі змінних x_1 - x_2 - x_3 (г)

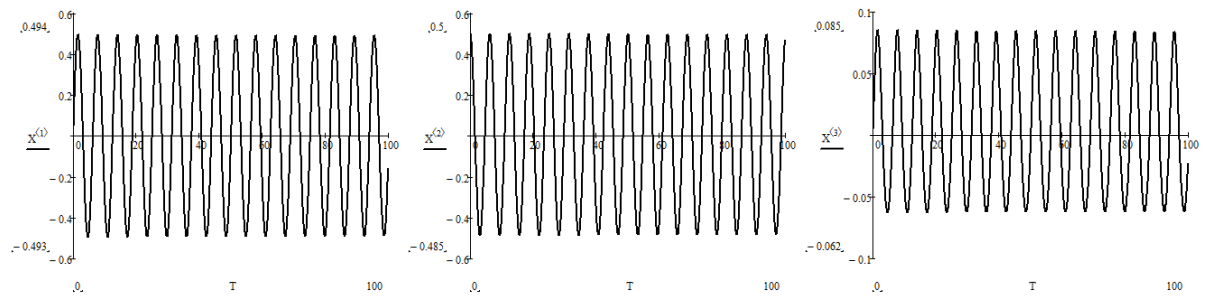


Рис. 4. Часові діаграми генерованих квазігармонічних коливань у нормованому часі (2)

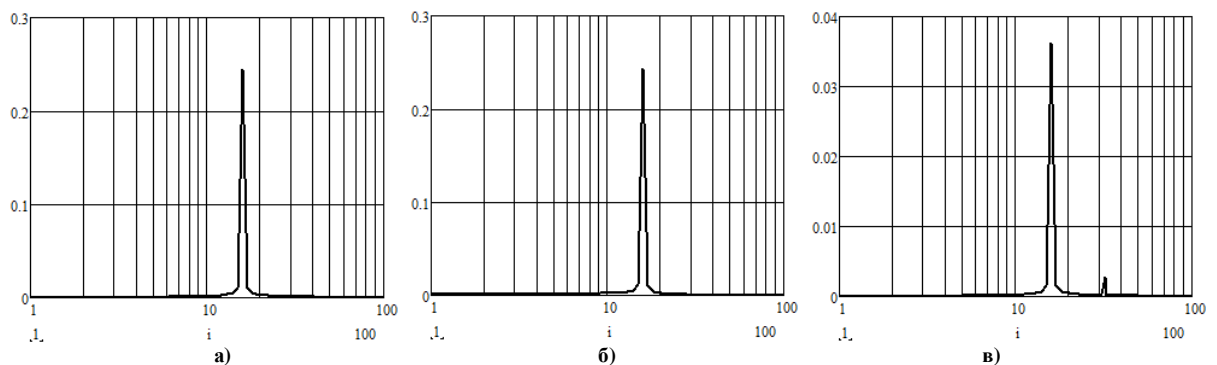


Рис. 5. Амплітудо-частотні спектри генерованих квазігармонічних коливань нормованих змінних x_1 (а), x_2 (б) і x_3 (в)

Режим хаотичних коливань генератору КПП з нелінійністю Λ -типу з двовитковим атрактором має місце при таких параметрах автоколивальної системи: $\varepsilon=0,2$ і $h=0,115$, $g=0,957$ (рис. 6 – рис. 8).

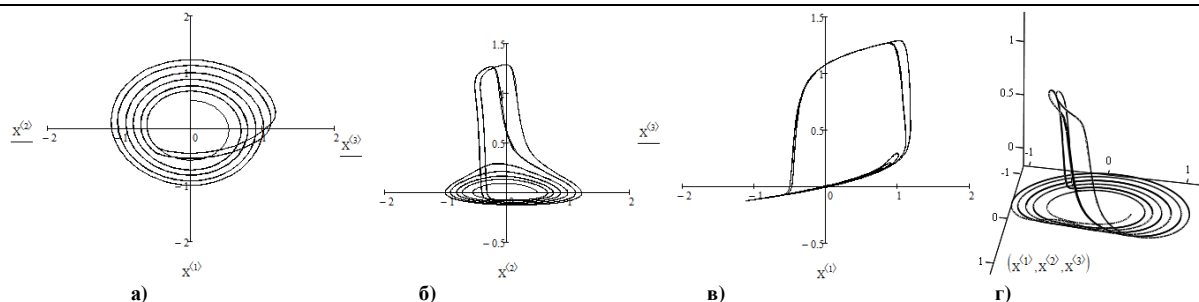


Рис. 6. Фазові портрети генератора КНР з нелінійністю Λ -типу в хаотичному режимі з двовитковим аттрактором у площинах змінних x_1 - x_2 (а), x_2 - x_3 (б), x_1 - x_3 (в) і просторі змінних x_1 - x_2 - x_3 (г)

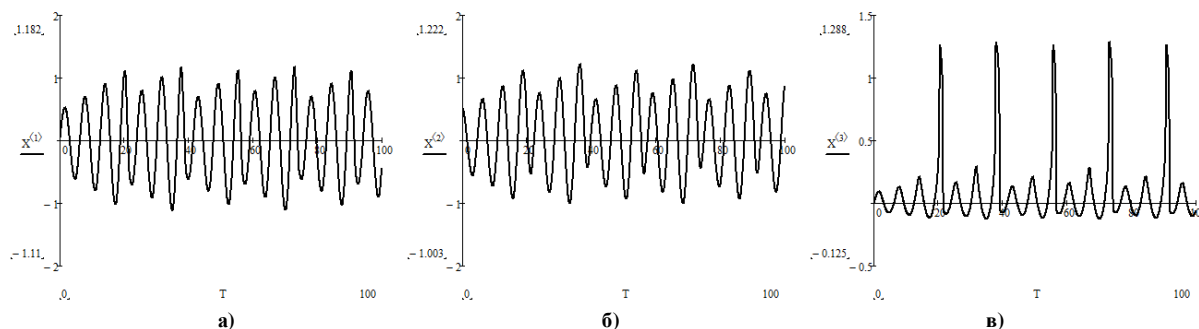


Рис. 7. Часові діаграми генерованих хаотичних коливань нормованих змінних x_1 (а), x_2 (б) і x_3 (в) у хаотичному режимі з двовитковим аттрактором

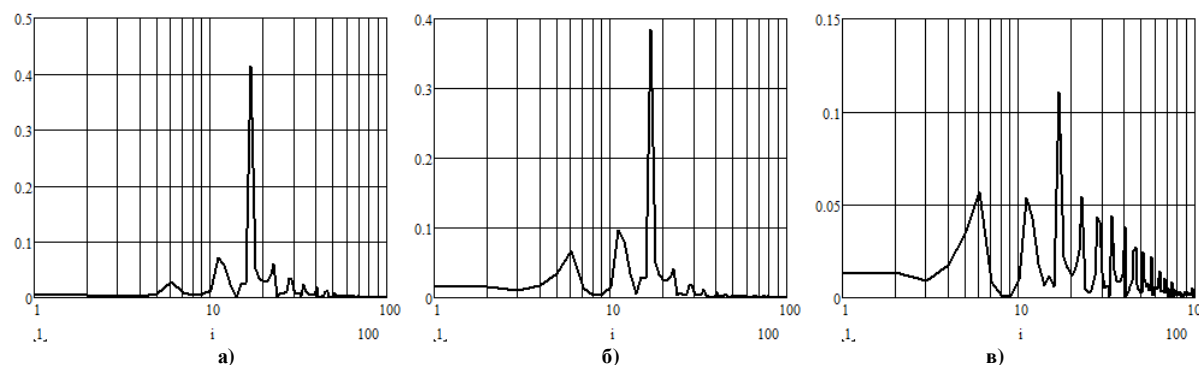


Рис. 8. Амплітудо-частотні спектри генерованих хаотичних коливань нормованих змінних x_1 (а), x_2 (б) і x_3 (в) у хаотичному режимі з двовитковим аттрактором

Режим хаотичних коливань генератора з багатовитковим аттрактором з нелінійністю N-типу має місце при таких параметрах автоколивальної системи: $\varepsilon=0,2$ і $h=0,107$, $g=0,957$ (рис. 9 – рис. 11).

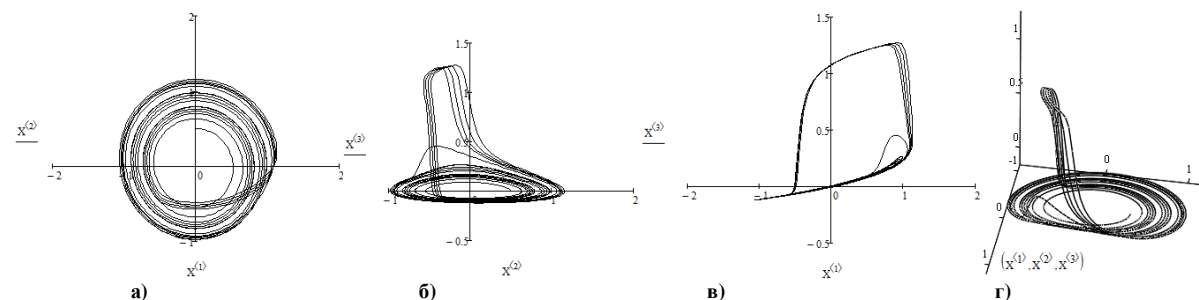


Рис. 9. Фазові портрети генератора КНР з нелінійністю Λ -типу в хаотичному режимі з багатовитковим аттрактором у площинах змінних x_1 - x_2 (а), x_2 - x_3 (б), x_1 - x_3 (в) і просторі змінних x_1 - x_2 - x_3 (г)

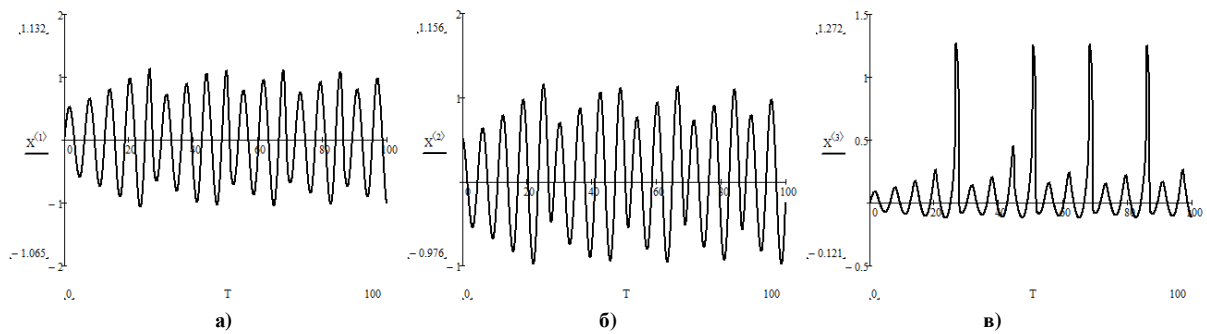


Рис. 10. Часові діаграми генерованих хаотичних коливань нормованих змінних x_1 (а), x_2 (б) і x_3 (в) у хаотичному режимі з багатовитковим аттрактором

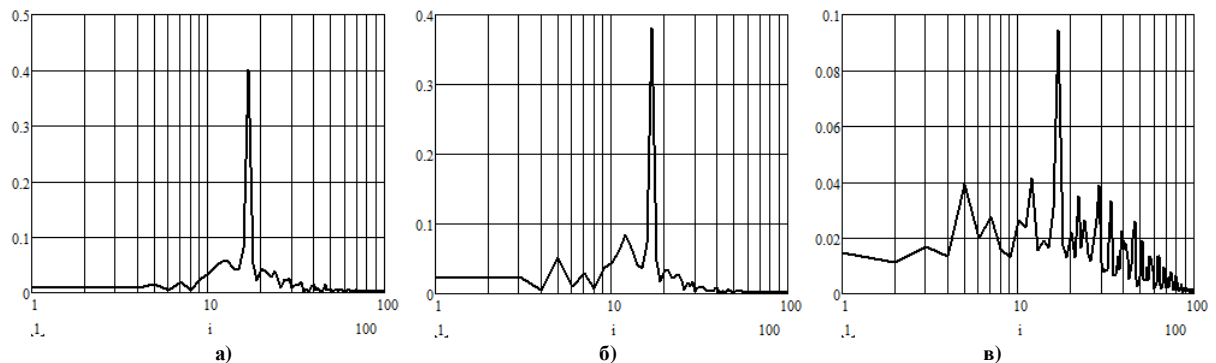


Рис. 11. Амплітудо-частотні спектри генерованих хаотичних коливань нормованих змінних x_1 (а), x_2 (б) і x_3 (в) у хаотичному режимі з багатовитковим аттрактором

Висновки

У роботі досліджено динамічні режими генератора детермінованого хаосу Кияшко-Піковського-Рабиновича на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Удосконалено математичну модель генератора КІР, яка на відміну від відомої, враховує вплив нелінійних властивостей підсилювального елемента генератора на динаміку хаотичних коливань. Показана можливість генерації хаотичних коливань генератора КІР із нелінійністю Λ -типу. Як практичні результати в роботі отримано фазові портрети, часові та частотні характеристики коливань в осциляторному та хаотичних режимах з двовитковим і багатовитковим аттракторами.

Література

1. Дмитриев А. С. Динамический хаос : Новые носители информации для систем связи / А. С. Дмитриев, А. И. Панас. – М.: Физматлит, 2002. – 251 с.
2. М. Р. Kennedy. Chaotic Electronics in Telecommunications / М. Р. 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. Vadim S. Anishchenko. Deterministic Nonlinear Systems. A Short Course / Vadim S. Anishchenko, Tatyana E. Vadivasova, Galina I. Strelkova. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
5. Шахтарин Б.И. Генераторы хаотических колебаний : учебн. пособие / [Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондратьев, С.В. Митин]. – М.: Гелиос АРВ, 2014. – 248 с.
6. Дмитриев А.С. Транзисторные генераторы хаоса малой мощности / А.С. Дмитриев, Е.Е. Ефремова, А.Ю. Никишов, А.И. Панас // Известия вузов «Прикладная нелинейная динамика». – 2008. – Т. 16. – №3. – с. 56-70.
7. Генерация хаоса / Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И. [под общ. ред. Дмитриева А.С.]. – М.: Техносфера, 2012. – 424 с.
8. А.с. 698118 СССР по классу Н 03 В 29/00. Генератор случайных сигналов / С.В. Кияшко, А.С. Пиковский, М.И. Рабинович. // Заявлено 23.03.1978; Заявитель – Институт прикладной физики АН СССР; Опубликовано 15.11.1979. Бюл. № 42. – 3 с.
9. Анісімов І. О. Синергетика : Навчальний посібник / І. О. Анісімов. – К.: КНУ ім. Т. Шевченка, 2006. – 159 с.
10. Беляев Н. В. Разработка и исследование генераторов детерминированного хаоса для телекоммуникационных систем / Н. В. Беляев // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций. – Новосибирск, 2009. – 16 с.
11. Анісімов І.О. Коливання та хвилі : Навчальний посібник / І.О. Анісімов. – К.: КНУ ім. Т.

Шевченка, 2001. – 218 с.

12. Andriy Semenov. Reviewing the Mathematical Models and Electrical Circuits of Deterministic Chaos Transistor Oscillators / Andriy Semenov // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Moscow: National Research University "Higher School of Economics". Russia, Moscow, May 12–14, 2016. IEEE Catalog Number: CFP16794-CDR. Online ISSN: 2380-6516. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491758

13. Andriy Semenov. Mathematical Simulation of the Chaotic Oscillator Based on a Field-Effect Transistor Structure With Negative Resistance / Andriy Semenov // 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", April 19-21, 2016, Kyiv, Ukraine p. 52 – 56. IEEE Catalog Number: CFP1605U-USB. ISBN: 978-1-5090-1430-9. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493008

14. Andriy O. Semenov. The deterministic chaos oscillator based on a field-effect transistor structure with negative resistance for telecommunications systems / Andriy O. Semenov // Journal of Informational and Telecommunication Sciences. – 2016. - №2. – pp. 46-53.

Reference

1. Dmitriev A. S. Dinamicheskie kaos : Novye nositeli informatsii dlya sistem svyazi / A. S. Dmitriev, A. I. Panas. – M.: Fizmatlit, 2002. – 251 s.

2. M. P. Kennedy. Chaotic Electronics in Telecommunications / M. P. Kennedy, R. Rovatti, G. Setti. – London: CRC Press, 2000. – 442 с.

3. Zalogin N.N. Shirokopolosnye khaoticheskie signaly v radiotekhnicheskikh i informatsionnykh sistemakh / N.N. Zalogin, V.V. Kislov. – M.: Radiotekhnika, 2006. – 205 s.

4. Vadim S. Anishchenko. Deterministic Nonlinear Systems. A Short Course / Vadim S. Anishchenko, Tatyana E. Vadivasova, Galina I. Strelkova. – Switzerland: Springer International Publishing, 2014.

5. Shakhtarin B.I. Generatory khaoticheskikh kolebanii : uchebn. posobie / [B.I. Shakhtarin, P.I. Kobylkina, Yu.A. Sidorkina, A.V. Kondrat'ev, S.V. Mitin]. – M.: Gelios ARV, 2014. – 248 s.

6. Dmitriev A.S. Tranzistornye generatory khaosa maloi moshchnosti / A.S. Dmitriev, E.E. Efremova, A.Yu. Nikishov, A.I. Panas // Izvestiya vuzov «Prikladnaya nelineinaya dinamika». – 2008. – T. 16. - №3. – s. 56-70.

7. Generatsiya khaosa / Dmitriev A.S., Efremova E.V., Maksimov N.A., Panas A.I. [pod obshch. red. Dmitrieva A.S.]. – M.: Tekhnosfera, 2012. – 424 s.

8. A.s. 698118 SSSR po klassu N 03 V 29/00. Generator sluchainykh signalov / S.V. Kiyashko, A.S. Pikovskii, M.I. Rabinovich. // Zayavleno 23.03.1978; Zayavitel' – Institut prikladnoi fiziki AN SSSR; Opublikovano 15.11.1979. Byul. № 42. – 3 s.

9. Anisimov I. O. Synerhetyka : Navchalnyi posibnyk / I. O. Anisimov. – K.: KNU im. T. Shevchenka, 2006. – 159 s.

10. Belyaev N. V. Razrabotka i issledovanie generatorov determinirovannogo khaosa dlya telekommunikatsionnykh sistem / N. V. Belyaev // Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk po spetsial'nosti 05.12.13 – Sistemy, seti i ustroistva telekommunikatsii. – Novosibirsk, 2009. – 16 s.

11. Anisimov I.O. Kolyvannia ta khvyli : Navchalnyi posibnyk / I.O. Anisimov. – K.: KNU im. T. Shevchenka, 2001. – 218 s.

12. Andriy Semenov. Reviewing the Mathematical Models and Electrical Circuits of Deterministic Chaos Transistor Oscillators / Andriy Semenov // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Moscow: National Research University "Higher School of Economics". Russia, Moscow, May 12–14, 2016. IEEE Catalog Number: CFP16794-CDR. Online ISSN: 2380-6516. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491758

13. Andriy Semenov. Mathematical Simulation of the Chaotic Oscillator Based on a Field-Effect Transistor Structure With Negative Resistance / Andriy Semenov // 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", April 19-21, 2016, Kyiv, Ukraine p. 52 – 56. IEEE Catalog Number: CFP1605U-USB. ISBN: 978-1-5090-1430-9. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493008

14. Andriy O. Semenov. The deterministic chaos oscillator based on a field-effect transistor structure with negative resistance for telecommunications systems / Andriy O. Semenov // Journal of Informational and Telecommunication Sciences. – 2016. - №2. – pp. 46-53.

Отримана/Received : 29.9.2017 р. Надрукована/Printed : 10.10.2017 р.
Стаття рецензована редакційною колегією