

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОВІМІРЮВАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

**А. О. Семенов**

Вінницький національний технічний університет

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. E-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

Запропоновано і досліджено радіовимірювальний генератор детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором. Для опису динаміки хаотичних коливань використана модифікована математична модель Анищенко-Астахова. Запропоновано рівняння нелінійної апроксимації статичної вольт-амперної характеристики (ВАХ) біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором. За допомогою математичного моделювання досліджено хаотичну динаміку радіовимірювального генератора. Отримано фазові портрети генератора, часові діаграми та графіки амплітудо-частотних спектрів хаотичних коливань. Розроблено комп'ютерну схемотехнічну PSpice модель біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором. Побудовано графік сімейства статичних ВАХ біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором. Побудовано графіки частотної характеристики активної та реактивної складових повного опору біполярно-польової транзисторної структури. Досліджено вплив температури на характеристики біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором. Розроблено дослідний макет радіовимірювального генератора й отримано результати експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** генератор, хаос, модель, вимірювання, коливання.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

**А. А. Семёнов**

Винницкий национальный технический университет

Хмельницкое шоссе, 95, г. Винница, 21021, Украина. E-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

Предложено и исследован радиоизмерительный генератор детерминированного хаоса на основе биполярно-полевой транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Для описания динамики хаотических колебаний использована модифицированная математическая модель Анищенко-Астахова. Предложено уравнение нелинейной аппроксимации статической вольт-амперной характеристики (ВАХ) биполярно-полевой транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. С помощью математического моделирования исследовано хаотическую динамику радиоизмерительного генератора. Получены фазовые портреты генератора, временные диаграммы и графики амплитудно-частотных спектров хаотических колебаний. Разработана компьютерная схемотехническая PSpice модель биполярно-полевой транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Построен график семейства статических ВАХ биполярно-полевой транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Построены графики частотной характеристики активной и реактивной составляющих полного сопротивления биполярно-полевой транзисторной структуры. Исследовано влияние температуры на характеристики биполярно-полевой транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Разработан опытный макет радиоизмерительного генератора и получены результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** генератор, хаос, модель, измерение, колебания.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Сучасні методи та засоби підвищення чутливості вимірювання фізичних величин базуються на застосуванні генераторів електричних коливань і генераторних перетворювачах у складі вимірювального обладнання [1, 2]. У той же час класичні генераторні методи та засоби вичерпали можливості підвищення чутливості до зміни параметрів вимірюваної фізичної величини [3, 4]. Використання генератора хаотичних коливань у складі вимірювального обладнання дозволяє суттєвим чином підвищити чутливість вимірювань [5, 6]. Це зумовлено тим, що в нелінійних автоколивальних системах у хаотичному режимі максимальна сильна залежність реакції системи на малі зміни її параметрів або початкових умов [7, 8].

На сьогоднішній день відома велика кількість схемотехнічних і конструктивних рішень генераторів детермінованого хаосу [7]. Усі вони відрізняються за типом хаотичних систем, а також параметрами та характеристиками генерованих хаотичних коливань. При створенні радіовимірювальних генераторів детермінованого хаосу потрібно забезпечити

такі вимоги [3–6]: 1) структурну стійкість атракторів хаотичної автоколивальної системи у фазовому просторі; 2) високу чутливість до варіацій параметрів та/або початкових умов системи; 3) достатню амплітуду або потужність хаотичних коливань.

Тому розвиток теорії та створення транзисторних генераторів детермінованого хаосу є актуальною науково-технічною задачею [7, 8].

Метою роботи є дослідження впливу нелінійності статичної ВАХ біполярно-польової транзисторної структури на динаміку електричних коливань у радіовимірювальному генераторі детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** На рис. 1 представлена електрична схема генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором. У схемі на рис. 1 використані такі радіокомпоненти: VT1–BC847PH, VT2–2SCJ76, VD1–1N1202C, L = 250 мкГн, R1 = 50 кОм, R2 = 100 Ом, C1 = 190 пФ, C2 = 500 нФ. Напруги живлення обрано V1 = 5 В, V2 = 5,2 В.

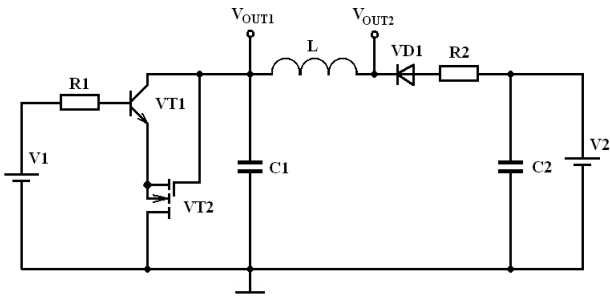


Рисунок 1 – Схема радіовимірювального генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором

Активний елемент генератора на біполярних транзисторах VT1-VT2 має сімейство  $\lambda$ -подібних вольт-амперних характеристик. Шляхом вибору напруги живлення V1 і V2 робоча точка встановлюється на спадній ділянці ВАХ. У такому випадку комплексний опір активного елемента генератора на електродах колектор VT1 - стік VT2 для змінного струму має від'ємні активну і реактивну складові. Паралельно активному елементу генератора підключений конденсатор C1 величиною 190 пФ. Таким чином, зменшено вплив залежно від амплітуди генерованої напруги величини ємнісної складової реактивного опору транзисторної структури VT1-VT2. Конденсатор C2 використовується для шунтування джерела живлення V2 від змінного струму. Коливальний контур генератора складається з котушки індуктивності L і ємнісного елемента у вигляді реактивної складової опору транзисторної структури VT1-VT2 з паралельно підключеним конденсатором C1.

Для чисельного моделювання динаміки електричних процесів в генераторі використовується математична модель Аніщенко-Астахова вигляду [9]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = mx_1 + x_2 - x_1x_3 - dG(x_1) \\ \dot{x}_2 = -x_1 \\ \dot{x}_3 = -gx_3 + gI(x_1)F(x_1) \end{cases}, \quad (1)$$

де функції  $G(x_1)$ ,  $F(x_1)$  та  $I(x_1)$  визначаються відповідно рівняннями (2)-(4)

$$G(x_1) = 2,029 \cdot 10^{-3}x_1 + 1,037\sqrt{1-1,002x_1} \tanh\left(\frac{25x_1}{1-1,002x_1}\right), \quad (2)$$

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

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

Функції  $G(x_1)$  і  $F(x_1)$  описують нормовані статичні ВАХ транзисторної структури VT1-VT2 і діода VD1. Графіки цих функцій представлені на рис. 2 – рис. 3.

Функція  $I(x_1)$  необхідна для опису фізичних процесів в діоді, який не пропускає електричний струм у зворотному напрямку. Графік функції  $I(x_1)$  наведений на рис. 4.

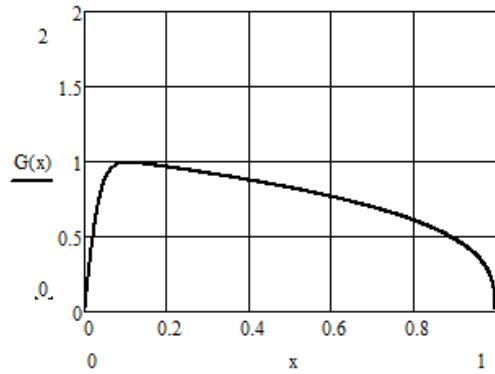


Рисунок 2 – Нормована ВАХ транзисторної структури VT1-VT2

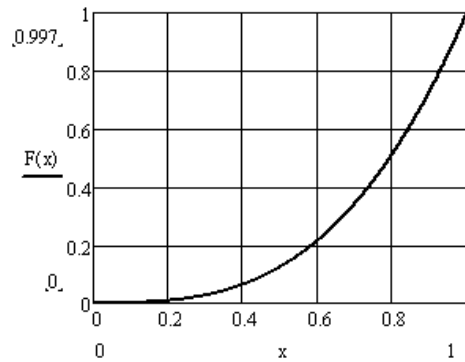


Рисунок 3 – Нормована ВАХ діода VD1

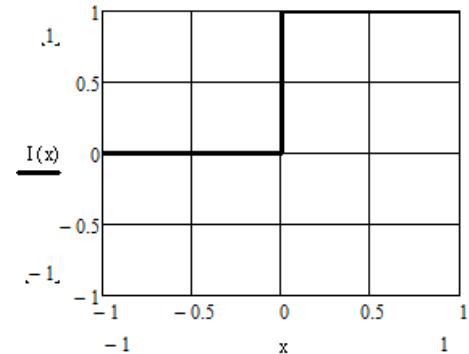


Рисунок 4 – Графік нормованої функції  $I(x)$

Математичне моделювання системи диференціальних рівнянь (1) з урахуванням (2)-(4) здійснено в пакеті програм MathCad 15.0 при таких коефіцієнтах  $m = 1,117$ ,  $d = 0,01$ ,  $g = 2,0$ . Диференціальні рівняння вирішені методом Рунге-Кутта 4-го порядку за допомогою стандартної функції *rkfixed()* [9]. Результати моделювання наведені на рис. 5 – рис. 7.

На рис. 5 наведено фазові портрети радіовимірювального генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором у різних площинах і динамічному просторі нормованих змінних.

Часові діаграми хаотичних коливань нормованих динамічних змінних у нормованому часі  $T = t/\sqrt{LC_1}$  наведені на рис. 6.

Амплітудо-частотний спектр генерованих хаотичних коливань наведений на рис. 8 (на всіх абсцис порядковий номер гармоніки по відношенню до основної частоти  $f \approx 1/\sqrt{LC_1}$ ).

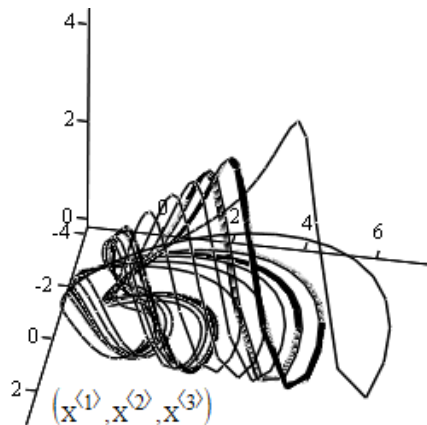
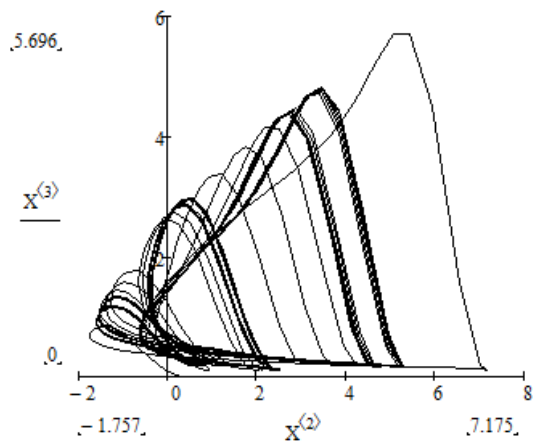
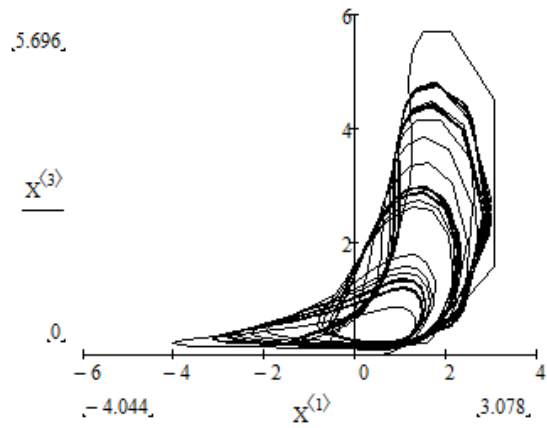
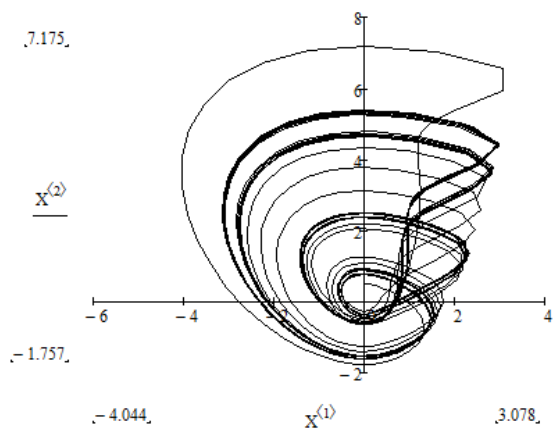
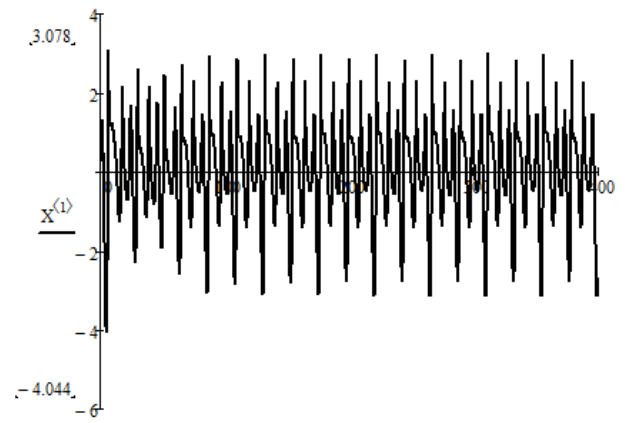
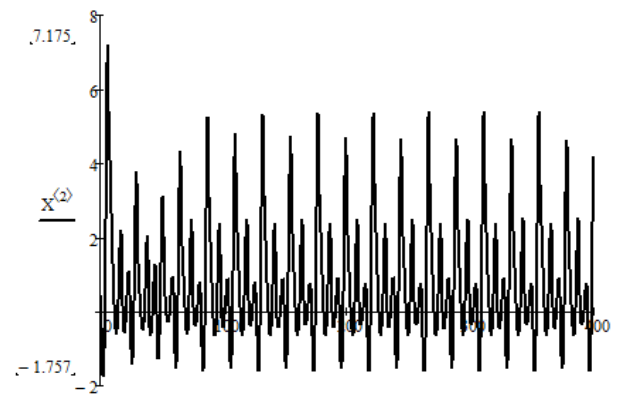


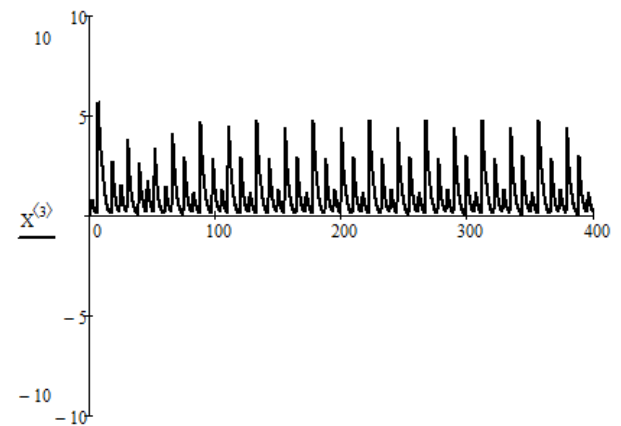
Рисунок 5 – Фазові портрети генератора в площинах змінних  $x_1-x_2$ ,  $x_1-x_3$  і  $x_2-x_3$  та в просторі змінних  $x_1-x_2-x_3$



а)



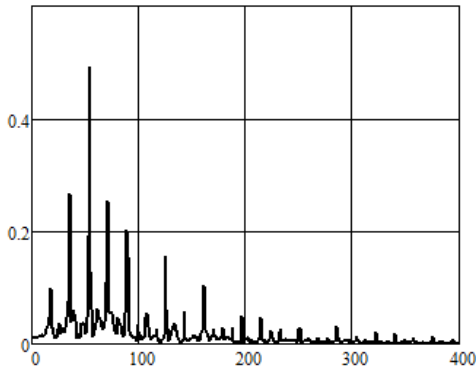
б)



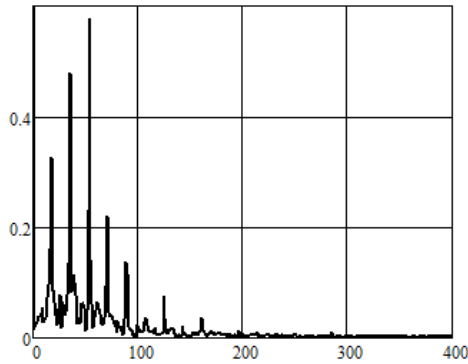
в)

Рисунок 6 – Діаграми нормованих змінних (а), (б) і (в) у нормованому часі  $T = \omega_0 t$

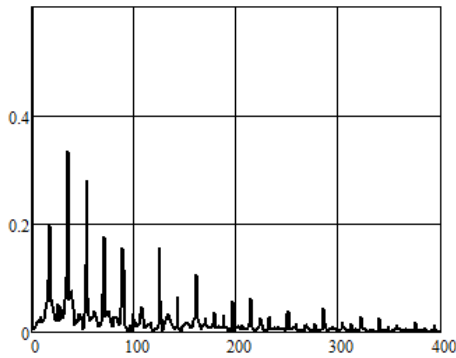
Комп'ютерне схемотехнічне моделювання активного елемента генератора на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємними опором проведено за допомогою пакету програм схемотехнічного аналізу MicroCAP 9.0 (рис. 8) [10].



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Амплітудо-частотні спектри нормованих змінних  $x_1$  (а),  $x_2$  (б) і  $x_3$  (в) де по вісі абсцис відкладено номер гармоніки відносно частоти  $\omega_0$

Для дослідження характеристик активного елемента генератора на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором використано високочастотний біполярний транзистор BF547\_PH з бібліотеки MicroCAP. Сімейство статичних вольт-амперних характеристик біполярно-польової транзисторної структури відносно напруги живлення джерела V1, при різних напругах керування джерела V2 (рис. 8) подана на рис. 9 [10]. На рис. 10 подано в напівлогарифмічному масштабі графіки частотної характеристики активної та реактивної складових повного опору біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором [10].

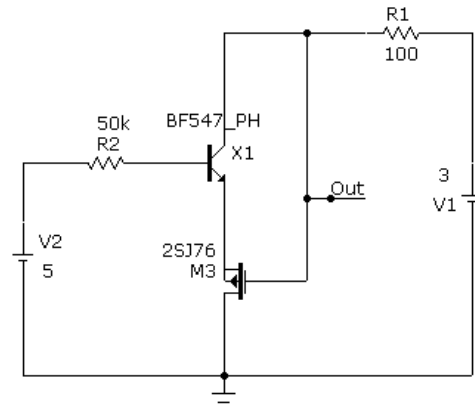


Рисунок 8 – Схема активного елемента генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором в програмі MicroCAP 9.0

При збільшенні напруги керування спостерігається збільшення максимального струму ВАХ (рис. 9). Як видно з рис. 9 характер зростаючої та спадної ділянок ВАХ є суто нелінійним. При напрузі керування 1 В ділянка від'ємного опору виникає в діапазоні напруг 0,3...0,65 В. При напрузі керування 7 В ділянка від'ємного опору виникає в діапазоні напруг 0,3...6,7 В. При збільшенні величини напруги керування спадну ділянку з від'ємним опором можна умовно поділяти на дві ділянки з малою крутістю та великою, що впливатиме на положення робочої точки та кут нахилу навантажувальної прямої [10]. З графіка на рис. 10 видно, що частотний робочий діапазон існування еквівалентної ємності біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором від 10 кГц до 29,9 МГц. Від'ємна складова повного опору постійна в діапазоні частот (10...320 кГц) і за модулем дорівнює 4250 Ом, перехідна ділянка плавного зростання знаходиться в межах від 320 кГц до 29,9 МГц, реактивна складова повного опору біполярно-польової транзисторної структури має форму перегнутого дзвона, мінімальна точка (точка перегину, екстремум) утворюється на частоті 4,84 МГц [10].

Як дію дестабілізуючих факторів на роботу радіовимірювального генератора шляхом схематичного моделювання було досліджено вплив температури на характеристики біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором (рис. 11 – рис. 12) [10].

При збільшенні температури максимальний струм збільшується на 0,05 мА та 0,097 мА для  $T = 50^\circ\text{C}$  та  $100^\circ\text{C}$  відповідно (рис. 11). При збільшенні температури зменшуються значення від'ємного опору, величина реактивної складової повного опору зменшується в діапазоні частот 5 кГц...6 МГц (рис. 12) [10].

Для експериментальних досліджень роботи радіовимірювального генератора детермінованого хаосу було побудовано дослідний макет [9]. Генератор може працювати в періодичних і хаотичних режимах залежно від номіналів пасивних елементів і напруги живлення. Результати експериментальних досліджень хаотичного режиму наведені на рис. 13 – рис. 15 [9].

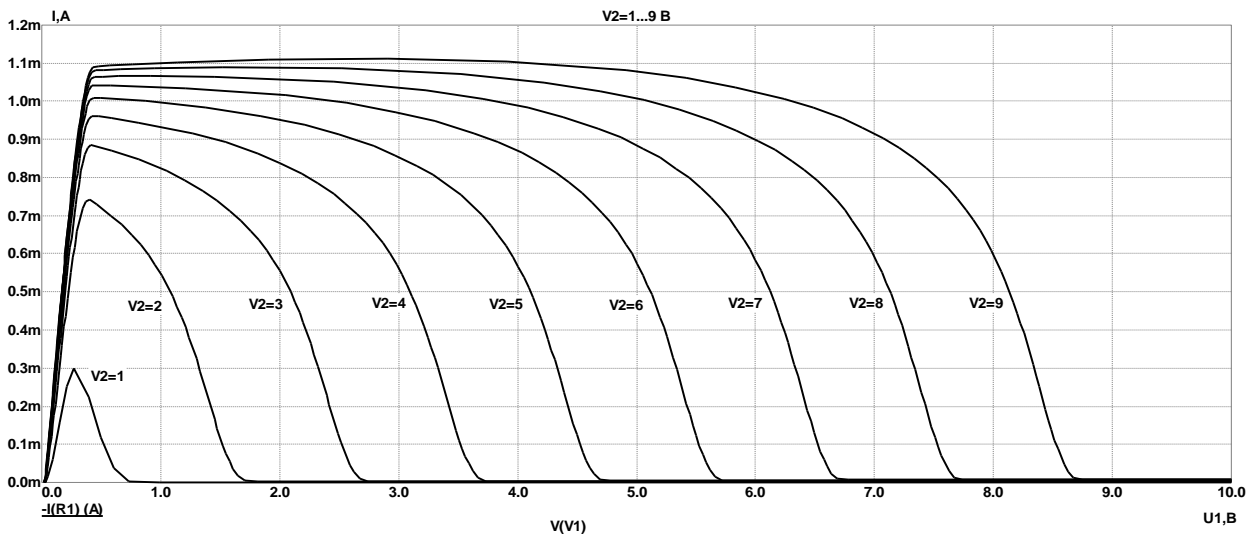


Рисунок 9 – Сімейство статичних ВАХ біполярно-польової транзисторної структури з від’ємним опором

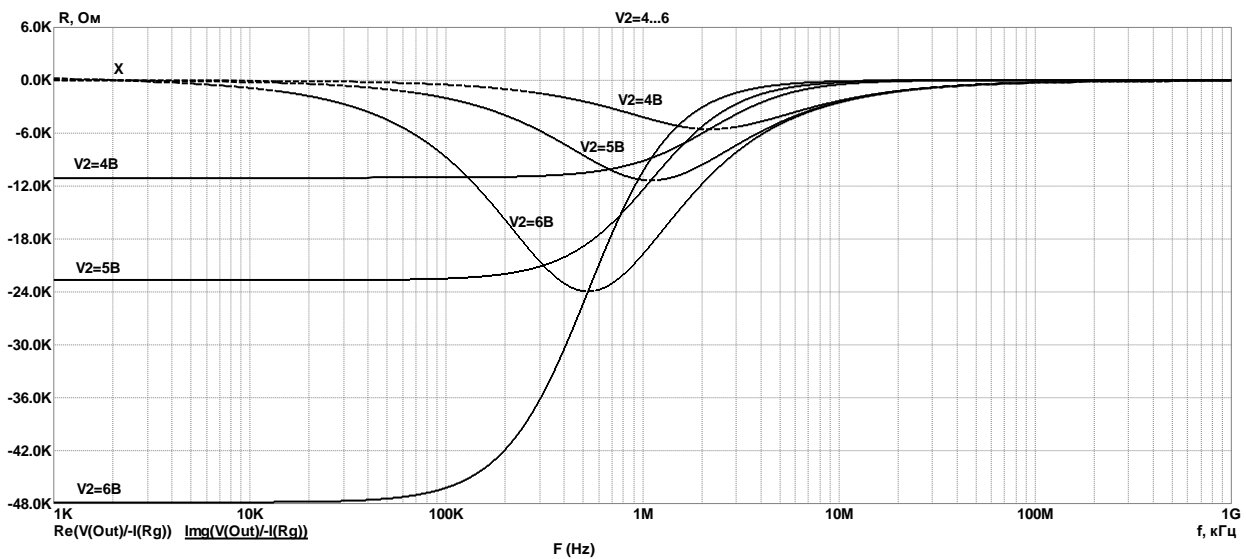


Рисунок 10 – Графіки частотної характеристики активної та реактивної складових повного опору біполярно-польової транзисторної структури (в напівлогарифмічному масштабі)

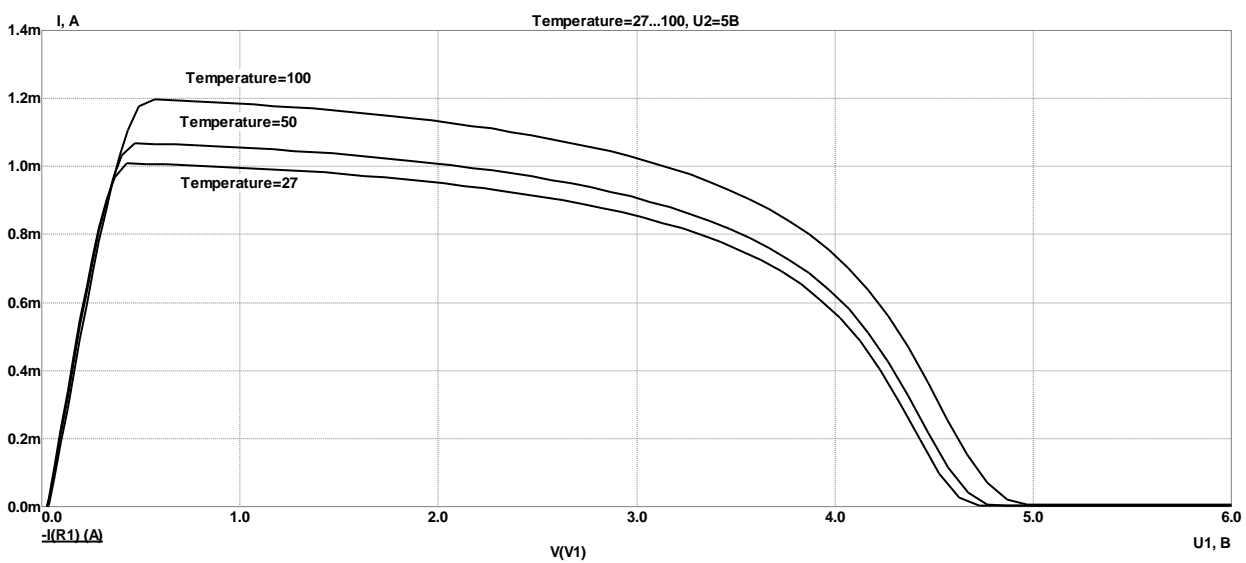


Рисунок 11 – Сімейство ВАХ активного елемента генератора на основі біполярно-польової транзисторної структури з від’ємними опором у діапазоні температур 27...100 °С

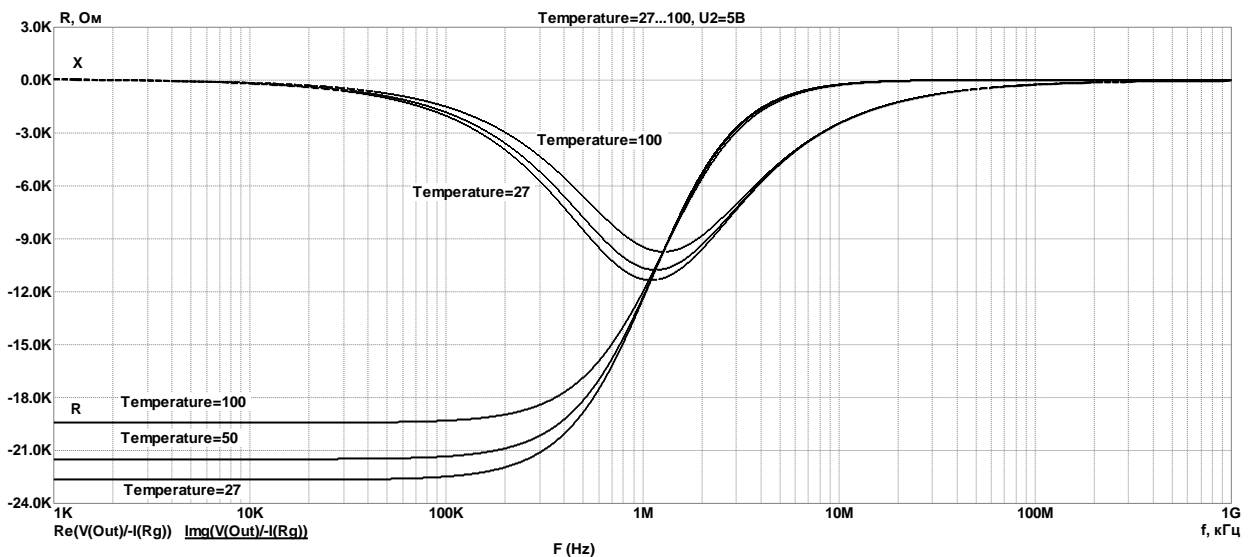


Рисунок 12 – Активна та реактивна складові повного опору біполярно-польової транзисторної структури у діапазоні температур 27...100 °С

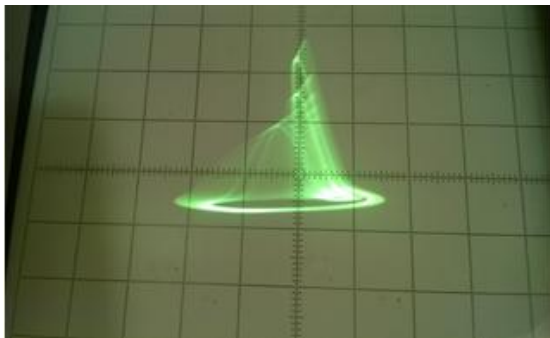


Рисунок 13 – Експериментальний фазовий портрет генератора

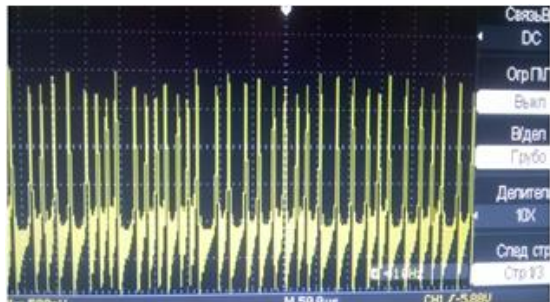


Рисунок 14 – Осцилограма хаотичної напруги  $V_{OUT}$

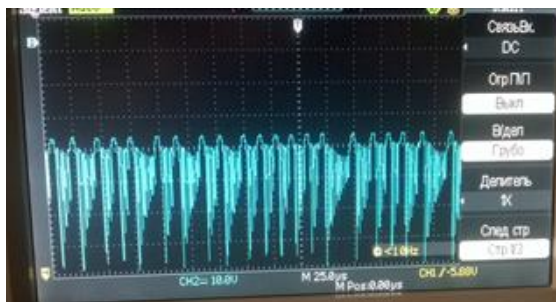


Рисунок 15 – Осцилограма хаотичної напруги  $V_{OUT}$

**ВИСНОВКИ.** У роботі запропонована та досліджена нова схема радіовимірювального генератора детермінованого хаосу на основі біполярно-польової транзисторної структури з від'ємним опором. Для

опису динаміки хаотичних коливань в генераторі використана відома математична модель Аніщенко-Астахова, яка доповнена нелінійною функцією апроксимації статичної ВАХ транзисторної структури і кубічним поліномом для апроксимації статичної ВАХ напівпровідникового діода. Отримано результати математичного моделювання, комп'ютерного схемотехнічного моделювання та експериментального дослідження.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Барабан С.В. Радіовимірювальні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором для неруйнівного теплового контролю. Вінниця: ВНТУ, 2015. 212 с. ISBN978-966-641-599-1.
2. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Савицький А.Ю. Радіовимірювальні перетворювачі вологості на основі МДН-структур. Вінниця: ВНТУ, 2016. 152 с. ISBN 978-966-641-649-3.
3. Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Маньковська В.С. Перетворювач опору в напругу з використанням RL-діодного генератора хаотичних коливань. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2012. № 06(82). С. 129–133.
4. Кучерук В.Ю., Маньковська В.С. Метод параметричних вимірювань з використанням генератора хаотичних коливань. *Вісник Інженерної академії України*. 2009. №1. С. 116–120.
5. Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Маньковська В.С. Використання прецизійних генераторів хаотичних коливань у вимірювальній техніці. *Вісник Інженерної академії України*. 2011. №3–4. С.152–156.
6. Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М., Маньковська В.С. Про основні принципи створення вимірювальних пристроїв з використанням генераторів хаотичних коливань. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2011. № 2. С. 101–104.
7. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И. Генерация хаоса / Под общ. ред. Дмитриева А.С. М.: Техносфера, 2012. 424 с.



8. Болонна Є.І., Розорінов Г.М., Шпатар П.М. Моделювання динамічного хаосу в генераторі Колпітца у програмному комплексі Mathematica. *Сучасний захист інформації*. 2014. №4. С. 75–80.

9. Andriy Semenov. Deterministic Chaos Oscillator Based on a Bipolar and Field-Effect Transistor Structure with Negative Resistance. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): Proceedings of the X International IEEE Scientific and Technical Confer-*

*ence, Omsk, Russia, 15–17 November, 2016*. P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819081.

10. 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. ISBN 978-966-641-405-5.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE DETERMINISTIC CHAOS RADIO-MEASURING OSCILLATOR BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE RESISTANCE

**A. Semenov**

Vinnitsia National Technical University

Khmelnyske shosse, 95, 21021, Vinnitsia. 21021, Ukraine. E-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

**Purpose.** To research how the non-linearity of the bipolar and field-effect transistor structure static I-V curve affects dynamics of the electric oscillation in the deterministic chaos radio-measuring oscillator. The developing chaos theory and designing deterministic chaos transistor oscillators are urgent scientific and technical tasks. Such requirements are to be fulfilled when designing the deterministic chaos radio-measuring oscillators: 1) structural persistence of self-oscillating chaotic system attractors in phase area; 2) high sensibility to the variation of parameters and/or initial conditions of the system; 3) sufficient amplitude or power of chaotic oscillation. **Methodology.** The deterministic chaos oscillator based on a bipolar and field-effect transistor structure with negative resistance is proposed and examined. The Anishchenko-Astakhov modified mathematical model was applied for describing the chaotic oscillation dynamics. Chaotic dynamics of the radio-measuring oscillator was studied by mathematical modeling. **Results.** Phase portraits of the oscillator, time diagrams and amplitude-frequency spectra of chaotic oscillations were obtained. The computer circuitry PSpice model of the bipolar and field-effect transistor structure with negative resistance was developed. The static I-V curve series graph for the bipolar and field-effect transistor structure with negative resistance was constructed. The frequency-response characteristics for active and reactive components of the bipolar and field-effect transistor structure impedance were plotted. The temperature effect for characteristics of the bipolar and field-effect transistor structure with negative resistance was examined. **Originality.** A new equation for nonlinear approximating the static I-V curve of the bipolar-field transistor structure with negative resistance was proposed. **Practical value.** The experimental breadboard of radio-measuring oscillator was developed, experimental research results were obtained. References 10, tables 0, figures 15.

**Key words:** oscillator, chaos, model, measurement, oscillation.

### REFERENCES

1. Osadchuk, V.S., Osadchuk, O.V., Baraban, S.V. (2015), “Radio vymiriuvalni peretvoriuvachi na osnovi tranzystornykh struktur z vidiemnym oporom dlia neruivnogo teplovoho kontroliu” [Radio measuring transducers based on a transistor structures with negative resistance for non-destructive thermal control], Vinnitsia, VNTU, Ukraine. ISBN978-966-641-599-1.

2. Osadchuk, V.S., Osadchuk, O.V., Savytskyi, A.Yu. (2016), “Radio vymiriuvalni peretvoriuvachi volohosti na osnovi MDN-struktur” [Radio measuring humidity converters based on MDN structures], Vinnitsia, VNTU, Ukraine, ISBN 978-966-641-649-3.

3. Kucheruk, V.Yu., Sevastyanov, V.M., Mankovska, V.S. (2012), “Resistance to voltage converter using RL-diode generators of chaotic oscillations”, *Electrotechnic and computer systems*, Vol 06, No 82, pp. 129–133.

4. Kucheruk, V.Yu., Mankovska, V.S. (2009), “Method of parametric measurements using a chaotic oscillator generator”, *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, Vol. 1, pp. 116–120.

5. Kucheruk, V.Yu., Sevastyanov, V.M., Mankovska, V.S. (2011), “Using precision generators of chaotic oscillations in measuring equipment”, *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, Vol. 3-4, pp. 152–156.

6. Kucheruk, V.Yu., Sevastyanov, V.M., Mankovska, V.S. (2011), “On the setting up measuring devices using generators chaotic oscillations”, *Measuring and*

*computer science in technological processes*, Vol. 2, pp. 101–104.

7. Dmitriev, A.S., Efremova, E.V., Maksimov, N.A., Panas, A.I. (2012), “Generatsiya khaosa” [Generation of Chaos], Tekhnosfera, Moscow, Russia.

8. Bolonna, Ye.I., Rozorinov, H.M., Shpatar, P.M. (2014), “Modeliuvannia dynamichnoho khaosu v heneratori Kolpitsa u prohramnomu kompleksi Mathematica [Modeling Dynamic Chaos in the Kolpits Oscillator in the Mathematica Software System]”, *Modern information security*, Vol. 4, pp. 75–80.

9. Semenov, A. (2016), “Deterministic Chaos Oscillator Based on a Bipolar and Field-Effect Transistor Structure with Negative Resistance”, *X International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics)*, Russia, Omsk, 15–17 November, 2016, DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819081. pp. 1–4.

10. Osadchuk, V.S., Osadchuk, O.V., Semenov, A.O., Koval, K.O. (2011), “Funktionalni vuzly radiovymiriuvalnykh pryladiv na osnovi reaktivnykh vlastyvoste tranzystornykh struktur z vidiemnym oporom”, [Functional blocks of radio measuring devices based of a reactive properties of transistor structures with negative resistance], Vinnitsia, VNTU, 2011. ISBN 978-966-641-405-5.

Стаття надійшла 19.03.2018.