

ХАОТИЧНА АВТОКОЛИВАЛЬНА СИСТЕМА З КУБІЧНОЮ ІНЕРЦІЙНОЮ НЕЛІНІЙНІСТЮ НА ОСНОВІ ПРИЛАДУ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Анотація. Розглянуто хаотичну динаміку автоколивальної системи з кубічною інерційною нелінійністю, яка є модифікацією генератору Аніщенко-Астахова. Від класичного генератору Аніщенко-Астахова розглянута автоколивальна система відрізняється тим, що її активним елементом є прилад із від'ємним опором Λ -типу. Запропоновано математичну модель автоколивальної системи та отримано результати моделювання.

Ключові слова. Детермінований хаос, генератор Аніщенко-Астахова, від'ємний опір, фазовий портрет, амплітудний спектр, фазовий спектр.

А.О. SEMENOV

Vinnytsia National Technical University

THE CHAOTIC SELF-OSCILLATING SYSTEM WITH CUBE INERTIAL NON-LINEARITY BASED ON A DEVICE WITH NEGATIVE RESISTANCE

Abstract. The chaotic dynamics of the self-oscillating system with cube inertial non-linearity, which is a modification of the Anishchenko-Astakhov oscillator is considered. The considered self-oscillating system differs from the classic Anishchenko-Astakhov oscillator by its active element, which is a device with negative resistance Λ type. The mathematical model of the self-oscillating system is proposed, the results of simulation are obtained.

Keywords. Deterministic chaos, Anishchenko-Astakhov oscillator, negative resistance, phase portrait, amplitude spectrum, phase spectrum.

Вступ

На сьогоднішній день однією з головних проблем розвитку телекомунікаційних та обчислювальних систем є підвищення інформаційності та завадозахищеності повідомлень. Застосування дискретних сигналів як повідомлень із неперервними носійними та відомими видами модуляції й кодування інформації досягли гранично можливих значень завадостійкості. Альтернативою подальшого розвитку інформаційних технологій є використання ансамблів хаотичних сигналів і практичного застосування досягнень математичної теорії нелінійної динаміки та хаосу в інфокомунікаційних системах [1].

Дослідження відомих і створення нових нелінійних автоколивальних систем з хаотичною динамікою є актуальною науково-дослідною задачею. На сьогоднішній день систематизовано понад 3000 видів автоколивальних систем, відомо 84 основних типів генераторів хаосу [2]. Для прикладного застосування найбільшого поширення з цих систем отримали автоколивальні системи з квадратичною [3] та кубічною [2] нелінійностями.

Метою роботи є теоретичне та модельне дослідження нелінійної динаміки хаотичної автоколивальної системи з кубічною нелінійністю на основі приладу з від'ємним опором.

Елементи теорії генератору з інерційною нелінійністю

Автоколивальні системи з тривимірним фазовим простором найбільш прості та зручні поміж нелінійних систем з хаотичною динамікою. Класичним випадком є двопараметричні автоколивальні системи з 1,5 степенями свободи. У загальному вигляді такі автоколивальні системи на площині описуються рівняннями [4]

$$\ddot{x} + \varphi(x, \vec{\mu}) \dot{x} + \psi(x, \vec{\mu}) = 0, \quad (1)$$

де x - змінна, яка здійснює періодичні коливання, $\vec{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)$ - сукупність керуючих параметрів, $\varphi(x, \vec{\mu})$ і $\psi(x, \vec{\mu})$ - нелінійні функції, що характеризують дію сил, які забезпечують можливість цих коливань.

Для випадку реалізації електронних генераторів хаотичних коливань при розгляді кола зворотного зв'язку, що здійснює інерційне перетворення дії $x(t)$ у відгук $y(t)$, який керує параметрами активного елемента та коливального контуру генератору, рівняння (1) подають у вигляді [4]

$$\begin{aligned} \ddot{x} + F_1(x, z, \vec{\mu}) \dot{x} + F_2(x, z, \vec{\mu}) &= 0, \\ \dot{z} &= F_3(x, z, \vec{\mu}), \end{aligned} \quad (2)$$

де F_i - нелінійні функції.

Головною особливістю таких автоколивальних систем є те, що шляхом спрощень і математичних граничних перетворень такі системи зводяться до класичної системи Ван дер Поля. З поміж відомих автоколивальних хаотичних систем, що отримали широке практичне застосування, автором акцентовано увагу на такі три [4,5]: 1) генератор Кияшко-Піковського-Рабіновича (3); 2) генератор Теодорчика (4); 3) генератор Аніщенко-Астахова (5).

$$\begin{cases} \dot{x} = 2hx + y - gz \\ \dot{y} = -x \\ \dot{z} = x - f(z) \end{cases} \quad (3)$$

де $f(z) = 8.592z - 22z^2 + 14.408z^3$.

$$\begin{cases} \dot{x} = mx + y - xz, \\ \dot{y} = -x, \\ \dot{z} = -gz + x^2. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = mx + y - xz - dx^3, \\ \dot{y} = -x, \\ \dot{z} = -gz + g\Phi(x), \end{cases} \quad (5)$$

де $d = d(S_1)$ - параметр, який відповідає степеню впливу нелінійності крутизни характеристики активного елементу генератору; $\Phi(x)$ - функція, що описує властивості інерційного перетворювача [6]:

$$\Phi(x) = I(x)x^2, \quad I(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Математична модель хаотичної автоколивальної системи з кубічною інерційною нелінійністю

Для опису динаміки хаотичних процесів у генераторі на основі приладу з від'ємним опором автором запропоновано автоколивальну систему, яка описується такими диференціальними рівняннями

$$\begin{cases} \dot{x} = mx + y - xz - dG(x), \\ \dot{y} = -x, \\ \dot{z} = -gz + gI(x)F(x), \end{cases} \quad (7)$$

де $F(x)$ - нормована функція апроксимації ВАХ інерційного елементу (напівпровідникового діоду), графік якої зображений на рис. 1

$$F(x) = 2,88 \cdot 10^{-6}x + 2,074 \cdot 10^{-3}x^2 + 0,995x^3, \quad (8)$$

$G(x)$ - нормована функція апроксимації функція апроксимації ВАХ λ -типу приладу з від'ємним опором, графік якої зображений на рис. 1

$$G(x) = -1,143 \cdot 10^{-3} + 6,972x - 14,382x^2 + 7,439x^3. \quad (8)$$

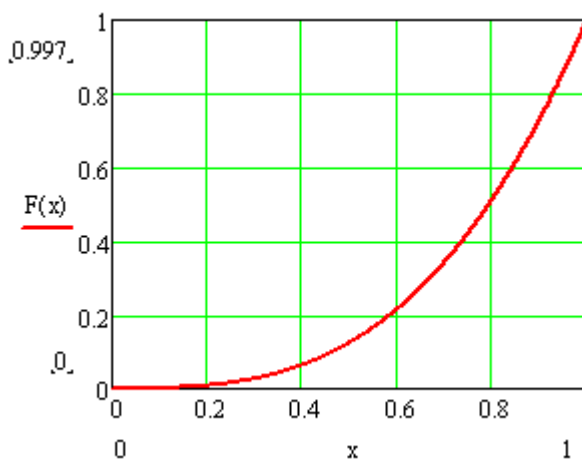


Рис. 1. Графік нормованої функції $F(x)$

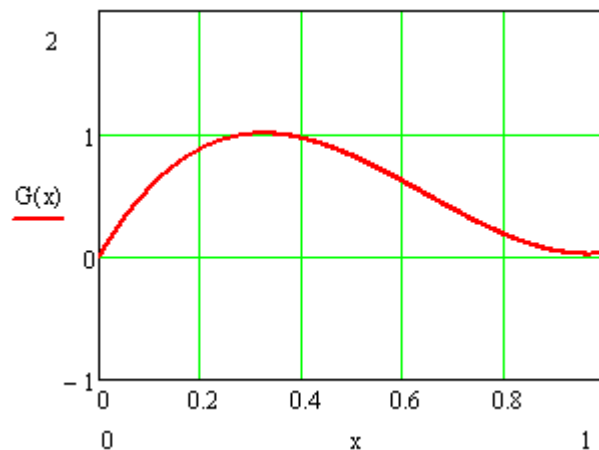
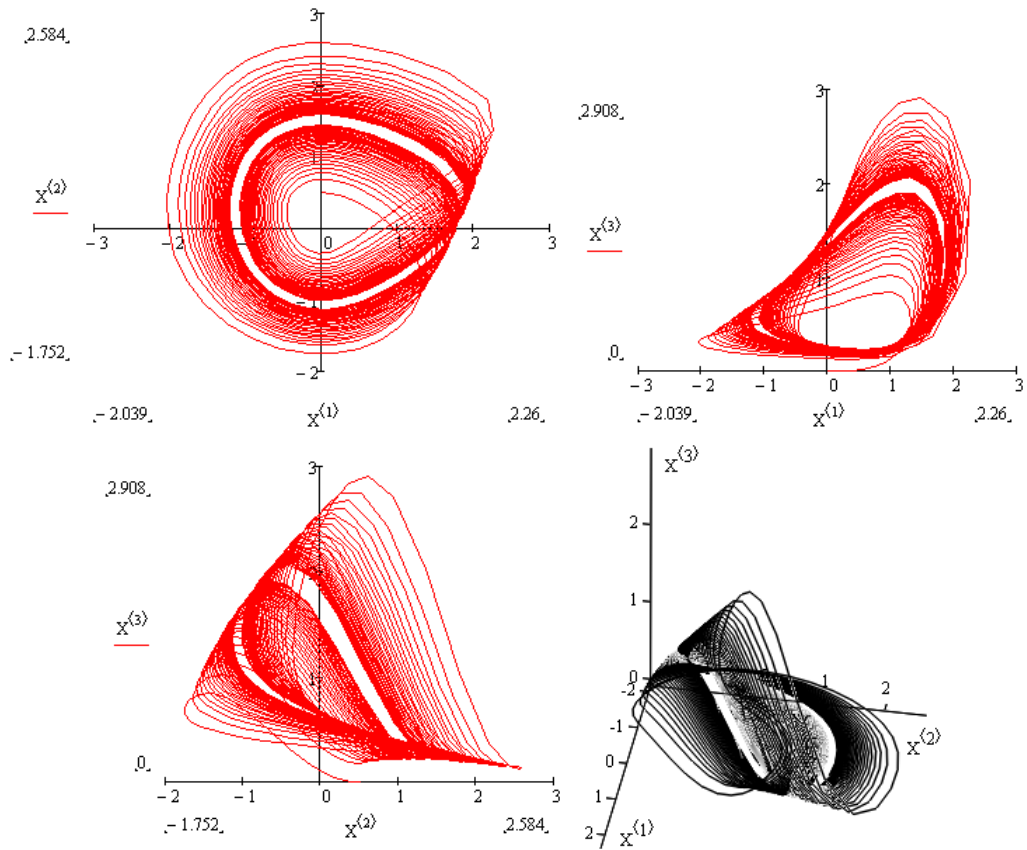
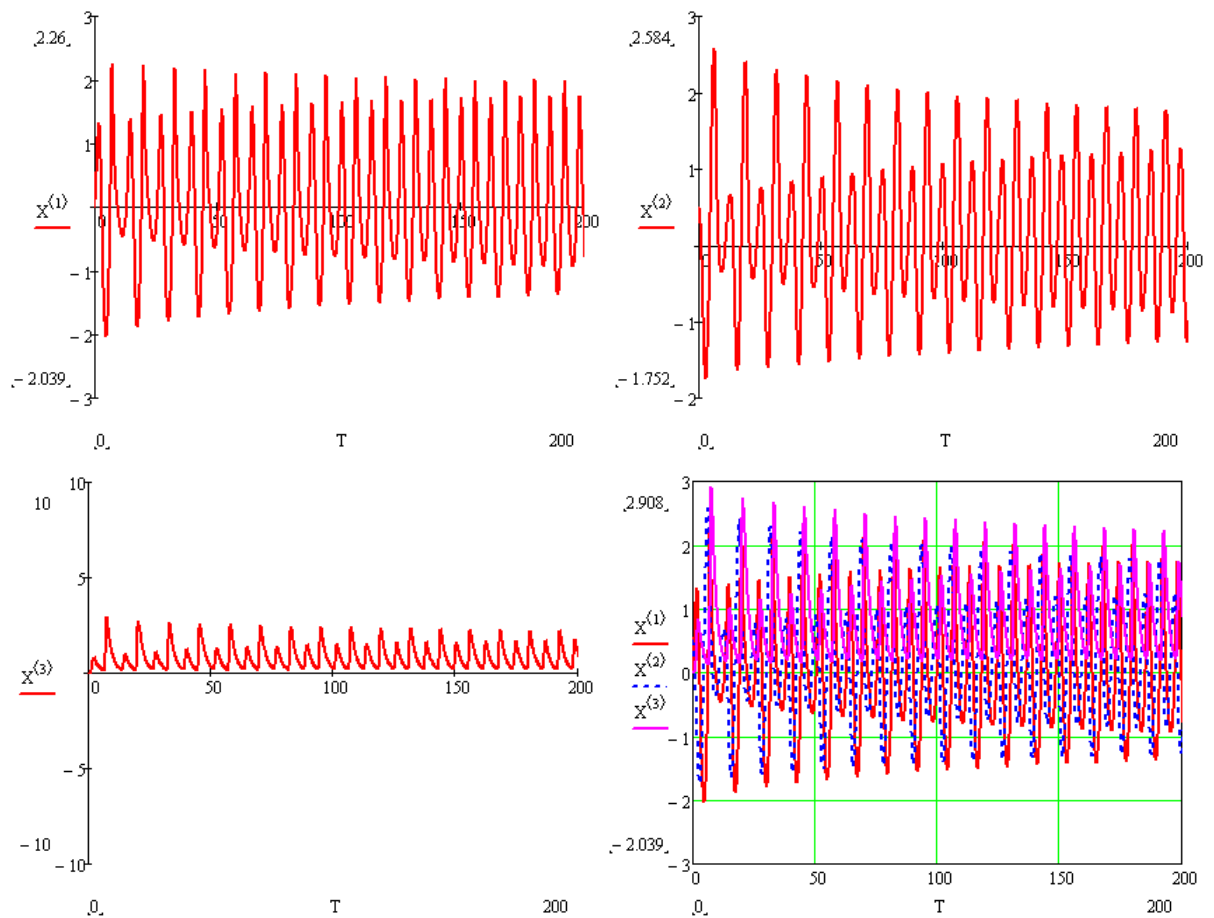


Рис. 2. Графік нормованої функції $G(x)$

Результати математичного моделювання

Математичне моделювання системи нелінійних диференціальних рівнянь (7) з урахуванням рівнянь апроксимації (8) і (9) проведено в програмі MathCad 15.0 для таких коефіцієнтів: $m=1,117$, $d=0,01$, $g=2,0$. Рішення системи диференціальних рівнянь здійснено методом Рунге-Кутта 4-го порядку за допомогою стандартної функції *rkfixed()*. Моделювання хаотичного режиму автоколивальної системи здійснено відповідно до послідовності [7] і результати наведено на рис. 3 – рис. 5.

Рис. 3. Фазові портрети хаотичних коливань в площинах змінних x_1 - x_2 , x_1 - x_3 , x_2 - x_3 та просторі змінних x_1 - x_2 - x_3 Рис. 4. Діаграми хаотичних коливань в нормованому часі відповідно змінних $x_1(T)$, $x_2(T)$, $x_3(T)$ та сумішена

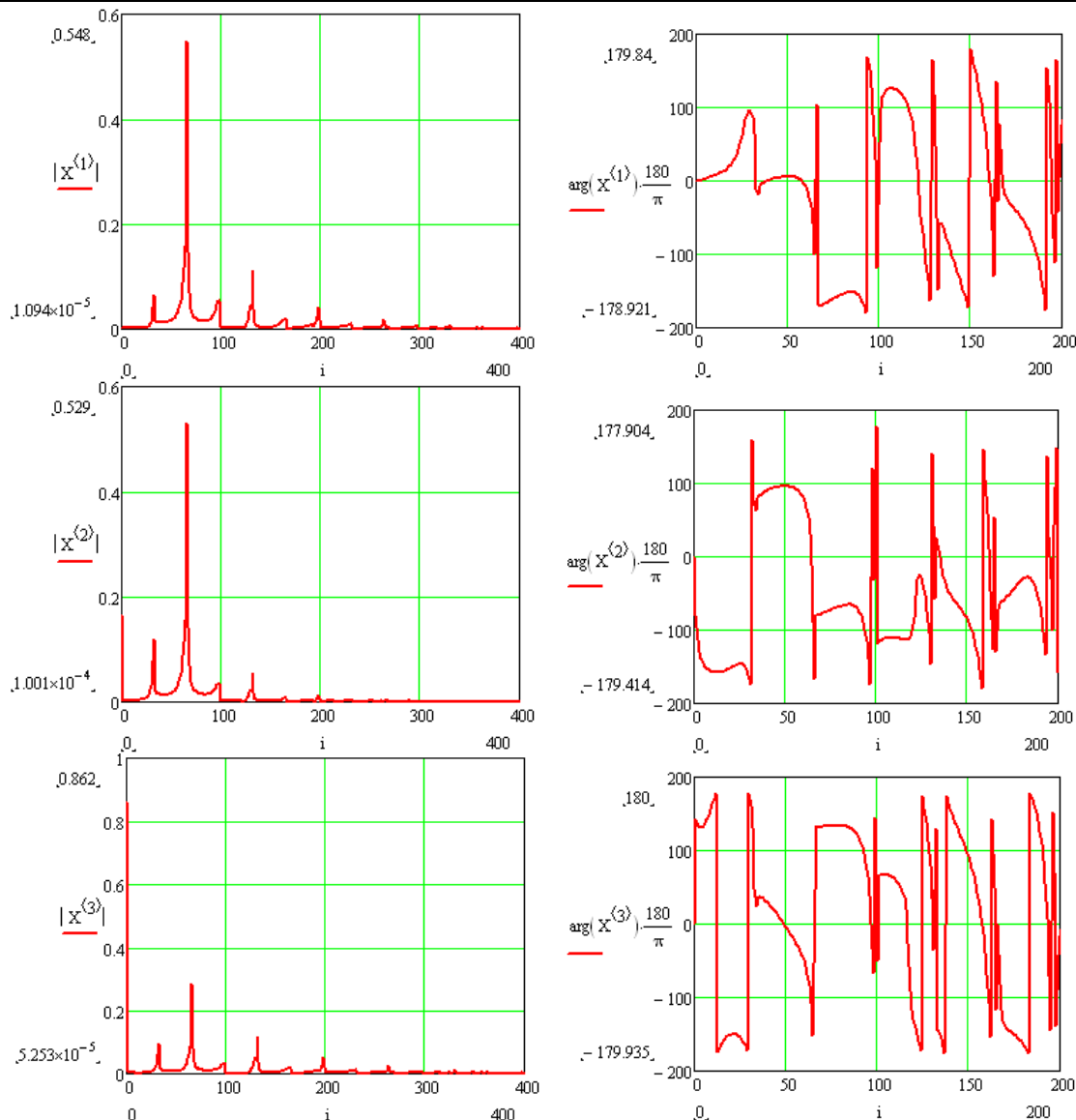


Рис. 5. Амплітудо- та фазочастотні спектри генерованих коливань (i – номер гармоніки)

Математичне моделювання в широкому діапазоні зміни параметрів автоколивальної системи (коефіцієнтів m , d , g) підтвердило здатність автоколивальної системи забезпечувати квазігармонічний, багаточастотний та хаотичний режими роботи. Дослідження динаміки розглянутої автоколивальної системи показує наявність квазігіперболічного хаосу.

З отриманих результатів математичного моделювання можна зробити висновок, що для реалізації найпростішого генератора хаотичних автоколивань Аніщенко-Астахова необхідно та достатньо виконання трьох умов: 1) використання активного елементу генератора із ВАХ Λ -типу з електричним керуванням нахилу спадної ділянки; 2) використання у колі зворотного зв'язку інерційного активного елементу з рівнянням апроксимації ВАХ не нижче другого степеня; 3) забезпечити виконання умов самозбудження автоколивань у широкому діапазоні напруг живлення.

Висновки

У роботі запропоновано хаотичну автоколивальну систему з кубічною інерційною нелінійністю, яка є модифікованим варіантом генератора Аніщенко-Астахова. Розроблено математичну модель автоколивальної системи з кубічною інерційною нелінійністю та досліджено динаміку коливань у хаотичному режимі. Отримано фазові портрети, часові та частотні залежності генерованих коливань у режимі квазігіперболічного хаосу. Виявлена можливість стійкої роботи пропонованої автоколивальної системи в квазіперіодичному, неперіодичному та хаотичному режимах. Здійснено рекомендації щодо практичної реалізації пропонованої хаотичної автоколивальної системи.

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. Meier, J. Darstellung von Attraktoren und Fraktalen mit Cinema Teil 3 / J.Meier // [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. - Електронні дані. - Hamburg, Friedrich-Ebert-Damm 10. - Режим доступу: <http://www.3d-meier.de/tut19/Seite0.html> (дата звернення 15.09.2016). - Назва з екрана.
3. Jinhu Lu. A new Chaotic System and Beyond: The Generalized Lorenz-Like System / Jinhu Lu // International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 14, No. 5, 2004. – pp. 1507-1537.
4. Анищенко В. С. Сложные колебания в простых системах : Механизмы возникновения, структура и свойства динамического хаоса в радиофизических системах // В. С. Анищенко. – М.: Наука, 1990. – 312 с.
5. 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..
6. Анищенко В. С. Генератор Анищенко-Астахова как одна из базовых моделей детерминированного хаоса / В. С. Анищенко, В. В. Астахов, Т. Е. Вадивасова // Известия Саратовского университета, 2005, Т. 5, Сер. Физика, Вып. 1. – С. 54-68.
7. Andriy O. Semenov. The Chaos Oscillator with Inertial Non-Linearity Based on a Transistor Structure with Negative Resistance / Andriy O. Semenov, Alexander V. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Kostyantyn O. Koval, Maksym O. Prytula. // 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.

References

1. S. Dmitriev, A. I. Panas. Dynamical chaos : New media for communication systems / A. S. Dmitriev, A. I. Panas. – Moscow, Fizmatlit, 2002. – 251 p. [In Russian]
2. Meier, J. Darstellung von Attraktoren und Fraktalen mit Cinema Teil 3 / J.Meier // Hamburg, Friedrich-Ebert-Damm 10. <http://www.3d-meier.de/tut19/Seite0.html>.
3. Jinhu Lu. A new Chaotic System and Beyond: The Generalized Lorenz-Like System / Jinhu Lu // International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 14, No. 5, 2004. – pp. 1507-1537.
4. Anishchenko V.S. Slozhnye kolebaniya v proctykh sistemakh : Mekhanizmy vozniknoveniya, structura i svojstva dinamicheskogo haosa v radiofizicheskikh sistemakh // V.S. Anishchenko. – M.: Nauka, 1990. – 312 p.
5. 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.
6. Anishchenko V.S., Astakhov V.V., and Vadivasova T.E, “Anishchenko-Astakhov self-sustained oscillator as one of the basic models of deterministic chaos,” Herald of Saratov University, pp. 54-68, 2005. Vol. 5, Nom. 1. (In Russian).
7. Andriy O. Semenov. The Chaos Oscillator with Inertial Non-Linearity Based on a Transistor Structure with Negative Resistance / Andriy O. Semenov, Alexander V. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Kostyantyn O. Koval, Maksym O. Prytula. // 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.

Рецензія/Peer review : 26.9.2016 р.

Надрукована/Printed : 8.11.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією