УДК 621.391.26

М.В. ФЕДУЛА
Хмельницький національний університет

ВИЯВЛЕННЯ ПЕРІОДИЧНИХ СИГНАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОБРОБКИ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТУ ХАОТИЧНОЇ СИСТЕМИ У ПЕРЕРІЗІ ПУАНКАРЕ

У роботі проведено аналіз процесу виявлення періодичних радіосигналів за допомогою хаотичної системи Дуффінга. В результаті аналізу розроблено модель виявлення періодичних сигналів шляхом обробки перерізу Пуанкаре для фазового портрету системи Дуффінга, яка працює у хаотичному режимі, без переходу до періодичного режиму.

Ключові слова: виявлення періодичних сигналів, хаотична система, система Дуффінга, фазовий портрет, переріз Пуанкаре.

M.V. FEDULA
Khmelnytskyi National University

PERIODIC SIGNAL DETECTION WITH USING CHAOTIC SYSTEM PHASE PORTRAIT PROCESSING IN POINCARE SECTION

Abstract – The aim of this research is the development of periodic signal detection method on the base of Duffing system Poincare map processing.

The chaos-based signal detection methods utilize the sensitivity of chaotic systems to weak periodic signals under strong noise. Mostly chaos-based detection methods are based on chaotic-to periodic system state transition under the input signal periodic component influence. But such methods are not popular in practical applications because of the critical state control problem complexity. The method presented does not include the critical state control process. The Duffing system can work with different exciting signal amplitudes in chaotic state. The decision about the presence or absence of periodic signal is made on the base of Duffing system phase portrait processing in Poincare section.

Thus the chaos-based signal detection method developed removes the restriction of the minimum input signal-to-noise ratio, which is caused by the critical state control error.

Keywords: periodic signal detection, chaotic system, Duffing system, phase portrait, Poincare section.

Вступ

Виявлення періодичних радіосигналів у шумах є однією із найважливіших задач сучасної радіотехніки та телекомунікацій. Процес виявлення періодичних сигналів є важливою частиною сучасних методів прийому радіосигналів, зокрема із амплітудною, частотною та фазовою маніпуляцією. Розвиток нових технологій в галузях комп'ютерної техніки і радіотехніки, тенденція ускладнення структури радіосигналів і збільшення кількості джерел електромагнітного випромінювання, ущільнення радіочастотного ресурсу диктують необхідність постійного розвитку і вдосконалення пристроїв приймання радіосигналів, невід'ємною частиною яких є блоки, які здійснюють операцію виявлення періодичних радіосигналів у шумах.

За останні 15–20 років були розроблені і реалізовані методи виявлення періодичних радіосигналів, які базуються на цифровій та аналоговій обробці сигналів із застосуванням опорних сигналів (когерентний прийом) та з накопиченням вхідного сигналу в часі (застосування кореляційних і згорткових функцій). У переважній більшості реалізацій вказаних методів застосовуються лінійні вхідні кола, побудовані на малошумних елементах сумісно із змішувачами на основі помножувачів. Нелінійні вхідні кола як правило застосовуються з метою зміни динамічного діапазону вхідного сигналу (компандування, логарифмування або ін.). Ефективність більшості приведених засобів на практиці обмежується відношенням сигнал/шум близько 0 дБ у смузі прийому корисного сигналу.

З 90-х років XX ст. відома нова група методів виявлення періодичних радіосигналів у шумах, які базуються на використанні чутливості хаотичних систем до слабких періодичних впливів [1]. В значній кількості робіт розглянуто методи виявлення періодичних сигналів за допомогою хаотичних систем, режим коливань яких змінюється від хаотичного до періодичного при досягненні періодичною складовою вхідного сигналу певного порогового рівня [2]. Такі методи базуються на чутливості показників Ляпунова хаотичної системи до слабких вхідних сигналів, так як відомо, що показники Ляпунова для двох однакових хаотичних систем розходяться при яких завгодно малих відмінностях їх вхідних сигналів за амплітудою або частотою [3].

Виявлення періодичних сигналів із застосуванням хаотичної системи Дуффінга

Огляд робіт в галузі виявлення періодичних радіосигналів за допомогою хаотичних систем показав, що найбільш зручною для дослідження процесу виявлення періодичних сигналів є система Дуффінга та її модифікації. Такі хаотичні системи відносно нескладно реалізуються і можуть функціонувати у хаотичному режимі протягом тривалого часу [1, 3]. У вказаних дослідженнях надається значна увага, в першу чергу, питанням ідентифікації хаотичного режиму коливань, оскільки у вказаних роботах виявлення періодичного сигналу здійснюється зі зміною режиму коливань системи від хаотичного до періодичного [2, 4, 5]. Основним недоліком такого підходу є необхідність постійної підтримки режиму коливань системи Дуффінга, близького до критичного хаотичного, при якому досягається найвища чутливість до слабких періодичних сигналів. Коли система Дуффінга перебуває у режимі, близькому до критичного, то її завадостійкість значно знижується, так як потужні неперіодичні сигнали з короткою тривалістю можуть переводити систему в періодичний режим коливань. У періодичному режимі коливань система Дуффінга нечутлива до слабких радіосигналів, і при зниженні рівня вхідного періодичного сигналу нижче порогового рівня вона не переходить назад у хаотичний режим, і тому її необхідно періодично перезапускати і заново встановлювати критичний режим коливань [6].

Вказані вище чинники не дають можливості ефективно використовувати на практиці наявні методи виявлення періодичних радіосигналів із застосуванням хаотичних систем. Тому актуальною є задача підвищення ефективності виявлення періодичних сигналів у шумах за допомогою хаотичних систем, які працюють у хаотичному режимі, без переходу до періодичного режиму.

Аналіз процесу виявлення періодичних сигналів за допомогою системи Дуффінга

На основі дослідження процесів, що відбуваються в хаотичній системі під дією шумів і призводять до погіршення характеристик виявлення сигналів, розроблено метод виявлення періодичного сигналу за фазовим портретом у перерізі Пуанкаре для системи Дуффінга, яка працює під впливом корисного періодичного сигналу і шуму.

В основу змісту даної моделі покладено вираз, що описує зміну фрактальної структури перерізу Пуанкаре для системи Дуффінга в часі, залежно від амплітуди періодичного сигналу на вході.

Математична модель системи Дуффінга задається рівнянням (1):

$$\ddot{x} + k\dot{x} - x + x^3 = s(t) \tag{1}$$

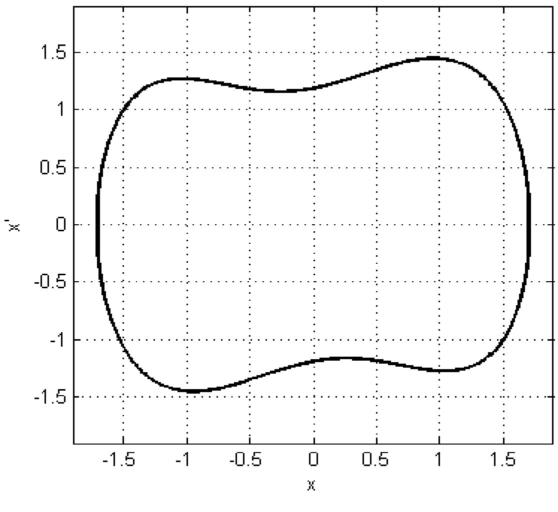
де x – вихідний сигнал;
k – коефіцієнт затухання;
$s(t)$ – вхідний сигнал.

Вхідний сигнал системи Дуффінга складається із трьох компонентів:

$$s(t) = s_0(t) + s_1(t) + N(t), \tag{2}$$

де $s_0(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ – задавальний сигнал великої амплітуди на частоті ω_0, який визначає режим коливання системи Дуффінга; $s_1(t) = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$ – періодичних корисний сигнал з малою амплітудою $A_1 << A_0$ на частоті $\omega_1 \to \omega_0$, який необхідно виявити на фоні шуму $N(t)$; $N(t)$ – вхідний шум.

В залежності від встановлених параметрів та вхідного сигналу, система Дуффінга (1) може перебувати у режимі періодичних коливань (рис. 1, а) або у режимі хаотичних коливань (рис. 1, б).



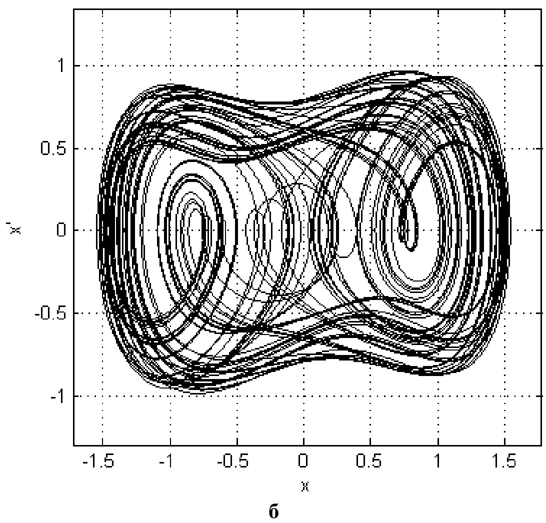


Рис. 1. Фазові траєкторії системи (1) у періодичному (а) і хаотичному (б) режимі

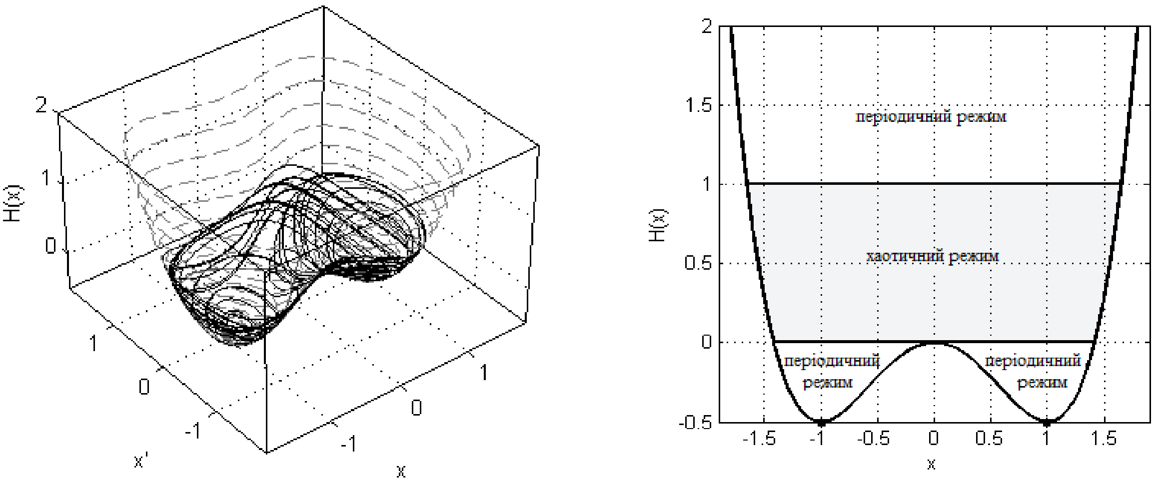
Потенціальна функція системи Дуффінга визначається виразом:

$$H(x) = \frac{1}{2} \cdot x^4 - x^2. \tag{3}$$

Для незбудженої системи (1) можна побудувати гамільтонову поверхню (рис. 2, а), яка визначається виразом (4):

$$H(x, x') = (x')^2 + \frac{1}{2} \cdot x^4 - x^2. \tag{4}$$

На поверхню (4) можна спроектувати фазові траєкторії системи Дуффінга, на вході якої діє сигнал $s(t)$, що зображено на рис. 2, а.



а **б**

Рис. 2. Проекція фазових траєкторій системи (1) на гамільтонову поверхню (а); потенціальна функція з позначенням режимів коливань (б)

Хаотичні коливання системи Дуффінга можливі лише для обмеженого діапазону значень потенціалу [7]. На рис. 2, б зображено область можливих хаотичних коливань відносно потенціальної функції (3) при типовому значенні коефіцієнта затухання $k = 0{,}5$. З рис. 2,б видно, що верхня область критичного режиму знаходиться поблизу значення $H = 1$. Потенціал системи Дуффінга сильно залежить від періодичної складової вхідного сигналу, і якщо корисна періодична складова $s_1(t)$ на частоті збудження коливань системи перевищує деякий порогів рівень, який відповідає значенню $H = 1$, то система Дуффінга переходить у періодичний режим. Таким чином здійснюється виявлення періодичних сигналів за відомими методами, розробленими протягом останнього десятиліття.

Враховуючи, що хаотичні коливання є неперіодичними, можна зауважити, що підтримувати стабільний режим коливань, близький до критичного, на практиці досить складно, і у багатьох випадках шуми можуть спричиняти перехід до періодичного режиму, і, відповідно, помилкове виявлення. Цей чинник накладає обмеження на мінімальне відношення сигнал/шум, необхідне для нормального виявлення періодичних сигналів.

З іншої сторони, слід зазначити, що чутливість хаотичної системи Дуффінга до слабких сигналів надзвичайно висока, так як у хаотичному режимі її показники Ляпунова розходяться постійно і неперервно в часі. Це означає, що метод виявлення періодичних сигналів зі зміною режиму не розкриває у повній мірі можливості підвищення ефективності виявлення періодичних сигналів, які надає застосування системи Дуффінга як вхідного пристрою.

Виявлення періодичних сигналів за допомогою системи Дуффінга у хаотичному режимі

Для більш детального дослідження фазовий портрет системи Дуффінга доцільно розглядати у перерізі Пуанкаре, взятому через один період коливань задавального сигналу $s_0(t)$ [8]. В ході експериментальних досліджень була виявлена залежність між амплітудою періодичної складової $s_1(t)$ і положенням миттєвого значення $(x(nT+\phi), x'(nT+\phi))$ фазового портрету відносно фрактальної структури перерізу Пуанкаре для системи Дуффінга, на вході якої діє задавальний сигнал $s_0(t)$.

Як показано на рис. 3, за наявності додаткової періодичної складової на вході, точка $(x(nT+\phi), x'(nT+\phi))$ зсувається вздовж фрактальної структури перерізу Пуанкаре для системи Дуффінга, збудженої сигналом $s_0(t)$.

В процесі експериментальних досліджень встановлено, що напрям і величина зсуву миттєвого значення $(x(nT+\phi), x'(nT+\phi))$ при збільшенні періодичної складової на частоті задавального сигналу, практично не залежать від шуму при умові відношення сигнал/шум, не меншого 0дБ у смузі частот до $10 \times \omega_0$.

Для позначення зміни довжини шляху точки $(x(nT+\phi), x'(nT+\phi))$ в залежності від зміни амплітуди u періодичного вхідного сигналу на частоті ω_0, введемо величину $\lambda(t,u)$, яка визначається виразом (5):

$$\lambda(t,u) = \int_{A_0}^{A_0+u} \sqrt{\left(\frac{\partial x(t,u)}{\partial u}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 x(t,u)}{\partial t \partial u}\right)^2}\, du \,. \qquad (5)$$

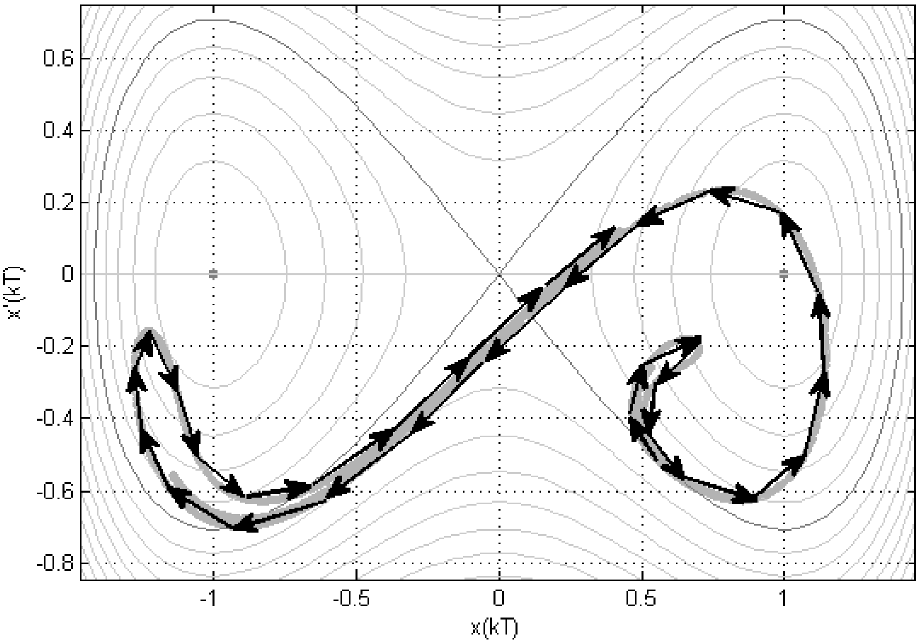


Рис. 3. Напрям зсуву точки $(x(nT+\phi), x'(nT+\phi))$ перерізу Пуанкаре при зростанні амплітуди періодичної складової вхідного сигналу

Так як сигнали $x(t,u)$ та $y(t,u)=\partial x(t,u)/\partial t$ є хаотичними, то виражати їх через аналітичні функції недоцільно. Тому більш зручною для моделювання процесу виявлення сигналів є дискретна форма вираження величини $\lambda(t,u)$ із кроками Δu і Δt за напругою та часом відповідно:

$$\lambda(n\cdot\Delta t, m\cdot\Delta u)=$$

$$\sum_{n=1}^{K}\sqrt{\left(x(n\cdot\Delta t, m\cdot\Delta u)-x(n\cdot\Delta t,(m-1)\cdot\Delta u)\right)^2+\left(y(n\cdot\Delta t, m\cdot\Delta u)-y(n\cdot\Delta t,(m-1)\cdot\Delta u)\right)^2}\,, \tag{6}$$

де Δt – крок дискретизації за часом;
Δu – крок дискретизації за амплітудою;
n , m – цілі числа.

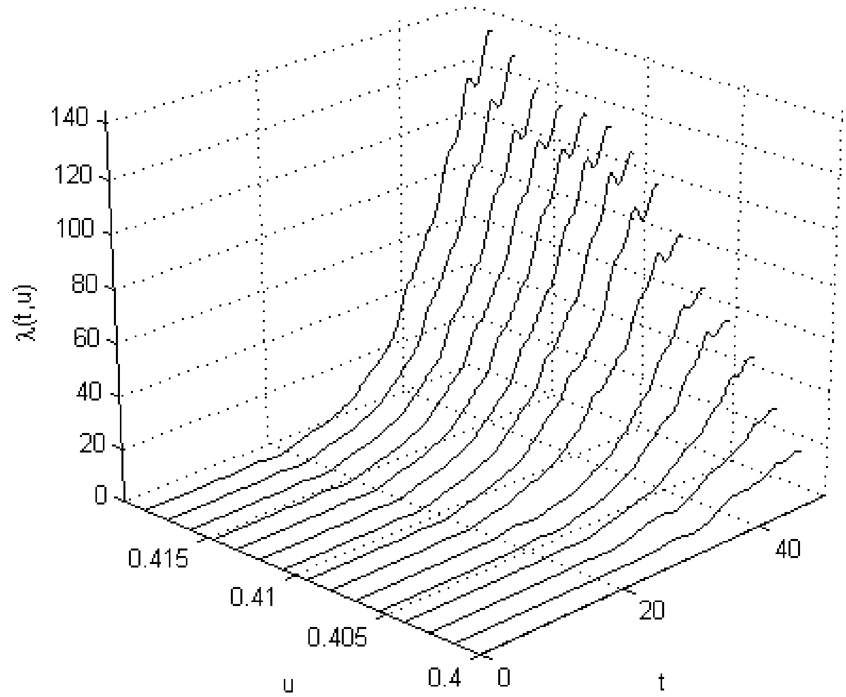


Рис. 4. Залежність величини шляху точки $(x(nT+\phi), x'(nT+\phi))$ від часу і амплітуди періодичної складової вхідного сигналу

З рис. 4 видно, що для величини $\lambda(t,u)$ можна встановити деякий пороговий рівень $\lambda_0(t,u)$, відносно якого може прийматися рішення про присутність або відсутність періодичної складової заданого діапазону амплітуд і частот на вході приймача.

Тоді процес виявлення періодичного сигналу можна описати виразами:

$$H_0 : \lambda(t,u) < \lambda_0(t,u)\,, \tag{7}$$

$$H_1 : \lambda(t,u) > \lambda_0(t,u)\,, \tag{8}$$

де H_0 – гіпотеза про відсутність періодичного сигналу;

H_1 – гіпотеза про присутність періодичного сигналу.

Висновки

У результаті проведеного дослідження отримано наступні результати:

1. Розроблено метод виявлення періодичного сигналу за перерізом Пуанкаре для системи Дуффінга, що працює під впливом корисного періодичного сигналу і шуму. Перевагою розробленого методу є відсутність необхідності забезпечення функціонування хаотичної системи у режимі, близькому до критичного. Таким чином в процесі виявлення сигналу за розробленим методом відсутні похибки, які виникають внаслідок нестабільності забезпечення критичного режиму.

2. Отримано аналітичний вираз залежності положення точки на фрактальній структурі перерізу Пуанкаре системи Дуффінга від амплітуди періодичної складової вхідного сигналу. Вираз дає можливість більш точно аналізувати вплив слабких періодичних складових вхідного сигналу на хаотичну динаміку системи Дуффінга.

Перспективним напрямом подальшої роботи є створення дискретних алгоритмів для оцінки шляху точки фазової траєкторії системи Дуффінга вздовж фрактальної структури її перерізу Пуанкаре залежно від часу. Такий підхід дасть можливість більш ефективного практичного застосування описаного методу внаслідок можливості інтеграції з цифровими пристроями прийому радіосигналів.

Література

1. Birx D. I. Chaotic oscillators and CMFFNS for signal detection in noise environments. IEEE International Joint Conference on Neural Networks. – 1992. – vol. 22, pp. 881–888
2. Jalilvand A., Fotoohabadi H. The Application of Duffing Oscillator in Weak Signal Detection. ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications. – 2011. – vol. 9, №1, pp. 1–6.
3. Li Yue, Yang Baojun. Chaotic system for the detection of periodic signals under the background of strong noise. Chinese Science Bulletin. – 2003. – V.48, №5, pp. 508–510.
4. Liyun S., Qian Y., Yuli Z., Jiaojun L. Noise Immunity of Duffing Oscillator and its Applications in Weak UWB Signal Detection. Journal of Networks. – 2012. – V.7, №3. – pp. 540–546.
5. Wang Guanyu Chen Dajun Lin Jianya Chen Xing. The application of chaotic oscillators to weak signal detection [J]. IEEE Transactions on industrial electronics. – 1999. – V.46, №20. – pp. 440–443.
6. Yang Jianhong Zhang Rencheng Fang Huaiying et al Application of Duffing Oscillator signal detection to arcing faults protection[J]. Automation of Electric Power System. – 2006. – V.30, №24. – pp. 69–72.
7. Moon F. C. Chaotic Vibrations. An Introduction for Applied Scientists and Engineers. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2004. – 312 p.
8. Ferrer, S., Lara, M., Families of Canonical Transformations by Hamilton-Jacobi-Poincare Equation. Application to Rotational and Orbital Motion, Journal of Geometric Mechanics. – 2010. – Vol.2. – pp. 223–241.

References

1. Birx D. I. Chaotic oscillators and CMFFNS for signal detection in noise environments. IEEE International Joint Conference on Neural Networks. – 1992. – vol. 22, pp.881–888.
2. Jalilvand A., Fotoohabadi H. The Application of Duffing Oscillator in Weak Signal Detection. ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics, and Communications. – 2011. – vol.9, №1, pp.1–6
3. Li Yue, Yang Baojun. Chaotic system for the detection of periodic signals under the background of strong noise. Chinese Science Bulletin. – 2003. – V.48, №5, pp.508–510.
4. Liyun S., Qian Y., Yuli Z., Jiaojun L. Noise Immunity of Duffing Oscillator and its Applications in Weak UWB Signal Detection. Journal of Networks. – 2012. – V.7, №3. – pp.540–546.
5. Wang Guanyu. Chen Dajun. Lin Jianya, Chen Xing. The application of chaotic oscillators to weak signal detection [J]. IEEE Transactions on industrial electronics. – 1999. – V.46, №20. – pp.440-443.
6. Yang Jianhong. Zhang Rencheng. Fang Huaiying. et al. Application of Duffing Oscillator signal detection to arcing faults protection[J]. Automation of Electric Power System. – 2006. – V.30, №24. – pp.69-72.
7. Moon F. C. Chaotic Vibrations. An Introduction for Applied Scientists and Engineers. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2004. – 312p.
8. Ferrer, S., Lara, M., Families of Canonical Transformations by Hamilton-Jacobi-Poincare Equation. Application to Rotational and Orbital Motion, Journal of Geometric Mechanics. – 2010. – Vol.2. – pp.223-241.

Рецензія/Peer review : 15.09.2014 р. Надрукована/Printed :1.10.2014 р.
Рецензент: д.т.н., проф. О.М. Шинкарук