УДК 621. 372. 011 **DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-116-126**
UDC 621. 372. 011

НОВИЙ ВИД ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСА: ДЕТЕРМІНОВАНИЙ ХАОС ДРУГОГО РОДУ

A NEW TYPE OF DETERMINISTIC CHAOS: DETERMINISTIC CHAOS OF THE SECOND KIND

Артеменко Владислав Андрійович, UT5UDJ, *магістр екології, науковий співробітник відділу гідрохімії, Український гідрометеорологічний інститут Державної служби України з надзвичайних ситуацій та Національної академії наук України, м. Київ, Україна, e-mail:* artemenko@uhmi.org.ua

https://orcid.org/0000-0003-0536-5415

Петрович Володимир Васильович, *кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна e-mail:* petrovichvv60@ukr.net

https://orcid.org/0000-0003-0422-2535

Анотація. На сучасному етапі явища детермінованого (динамічного) хаоса широко використовуються у науці та техніці. Актуальною задачею є вивчення нових явищ детермінованого хаосу.

Відомі прояви детермінованого хаосу пропонується більш точно називати детермінованим хаосом першого роду.

Детермінований хаос першого роду – це хаос, який безпосередньо пов'язаний із детерміновано-хаотичною поведінкою динамічних перемінних динамічної системи. Розглянуті характерні особливості детермінованого хаосу першого роду та методи його генерації.

Відкритий принципово новий вид дитермінованого хаосу – детермінований хаос другого роду.

Детермінований хаос другого роду беспосередньо не пов'язаний із детерміновано-хаотичною поведінкою динамічних перемінних динамічної системи. Він може визначатись у характеристиках, які прямо не повязані із динамічними перемінними.

Детермінований хаос другого роду виникає у певних проявах іншого порядку (наприклад, у Фур'є-спектрі). Тобто сам вихідний ряд (вихідний сигнал) може бути випадковим, але, в той же час, спектр цього ряду, якщо розглядати його як другий (інший) часовий ряд, може проявляти детерміновано-хаотичну поведінку.

У загальному випадку це може бути будь-який вид спектру не обов'язково Фур'є-спектр), або навіть інша, відмінна від спектру характеристика.

Запропонована загальна методика генерації рядів, які демонструють хаос другого роду.

Розглянуті два приклади детермінованого хаосу другого роду.

В дослідженні «наведений міст» між повністю випадковими системами та системами із детерміновано-хаотичною поведінкою.

Вперше було визначено, що певна система може розглядатись як випадкова із позицій її перемінних, але, в той же час, і як детерміновано-хаотична із позицій її спектру або інших подібних характеристик.

Мета роботи. Дослідження нового типу детермінованого хаосу (детермінованого хаосу другого роду), який відкритий авторами, визначення його основних властивостей та методів генерації.

Ключові слова: детермінований хаос другого роду, детермінований хаос у спектрі, генерація хаосу другого роду, міст між повністю випадковими системами та системами детерміновано-хаотичними, визначення системи як випадкової (з точки зору поведінки перемінних системи), так і системи детерміновано-хаотичної (поведінка спектру та інших подібних характеристик).

Наш великий недолік у тому, що ми занадто швидко опускаємо руки. Найбільш вірний шлях до успіху – весь час пробувати ще один раз.

Томас Едісон

Вступ

На сучасному етапі парадігма детермінованого хаосу є загальноприйнятою.

Методи детермінованого хаосу широко використовуються у науці та техниці. При цьому слід особливо підкреслити, що методи ці унікальні, не мають аналогів серед інших відомих методів досліджень.

З позицій екології методи детермінованого хаосу використовують в задачах прогнозування [1], а також ідентефікації та класифікації [2] динамічних систем.

Актуальною задачею є вивчення принципово нових явищ детермінованого хаосу та впровадження їх у практику.

У роботі показано, що існує інший, невідомий раніше вид дерермінованого хаосу, який автори назвали “детермінований хаос другого роду”.

Детермінований хаос першого роду

Як відомо, динамічний хаос звичайно розглядається із позиції поведінки динамічних перемінних всієї системи. Головними ознаками динамічного хаосу при цьому будуть слідуючі.

1. Динамічні перемінні з часом не йдуть у «нескінченність», тобто рух їх є певною мірою обмеженим.
2. Дуже малі відмінності у значеннях динамічних перемінних навіть при незначному проміжку часу призводять до суттєво інших траєкторій. Такі траєкторії звичайно знаходяться на хаотичному аттракторі.

Пункт 2 вказує також на важливість показника (показників) Ляпунова для характеристики систем, які проявляють детерміновано-хаотичну поведінку.

Про наявність детермінованого хаоса у динамічній системі прийнято стверджувати, якщо старший (головний) показник Ляпунова у системі позитивний.

Таким чином, для звичайного динамічного хаоса, тобто динамічного хаоса «першого роду», хаотичну поведінку системи пов’язують безпосередньо із поведінкою її динамічних перемінних.

Це і є головним критерієм динамічного хаоса «першого роду». При цьому цей хаос не є явищем однорідним. У динамічному хаосі «першого роду» можливо виділяти певні класи та навіть підкласи, між якими можуть спостерігатись помітні відмінності.

У цьому зв’язку можливий розподіл на дві великі групи. По-перше, це «часовий вид» хаосу (різницеві рівняння та звичайні диференціальні рівняння).

По-друге – «просторово-часовий» хаос, тобто диференціальні рівняння у часткових похідних та їх дискретні аналоги («решітки відображень» та інше).

Відмінності проявляються також у способі генерації хаотично-детермінованих рядів. Тому можлива класифікаці також за такою ознакою:

1. Різницеві рівняння;
2. Різницеві рівняння із затриманим аргументом (аргументами);
3. Звичайні диференціальні рівняння;
4. Звичайні диференціальні рівняння із затриманим аргументом (аргументами);
5. Звичайні диференціальні рівняння із дробним порядком диференціала (диференціалів);
6. Звичайні диференціальні рівняння одночфсно із дробним порядком диференціала (диференціалів) та затриманим аргументом (аргументами);
7. Диференціальні рівняння із частковими похідними;
8. Диференціальні рівняння із частковими похідними та затриманим аргументом (аргументами);
9. Диференціальні рівняння із частковими похідними та дробним порядком диференціала (диференціалів);
10. Диференціальні рівняння із частковими похідними та одночасно із дробним порядком (порядками) диференціалу (диференціалів) та затриманими аргументами.

Детерміновано-хаотичні ряди звичайно генерують згідно пунктів 1 … 7.

Слід особливо зазначити, що практика роботи авторів із звичайними диференціальними рівняннями свідчить, що застосування рівнянь із затриманим аргументом сприяє розвитку хаоса в системі. В той же час застосування диференціалів дробного порядку діє у зворотньому напрямку, тобто утруднює розвиток хаосу. Але такі висновки, звісно, ще потребують спеціальних додаткових досліджень і не є остаточними.

Детермінований хаос другого роду – новий вид хаоса у динамічних системах

У роботі визначений принципово новий вид хаоса у динамічних системах, який назвали детермінованим “хаосом другого роду”.

Детермінований хаос “другого роду” – це хаос, який у загальному випадку не пов'язаний із детерміновано-хаотичною поведінкою динамічних перемінних системи, а пов'язаний виключно із хаотичною поведінкою, наприклад, спектру цієї системи.

Нехай ми маємо співвідношення типу одновимірний сигнал (часовий ряд) та його спектр.

На рис.1 наведений фрагмент (перші 200 значень) ряду 1, на рис.2 – повний ряд довжиною 10000 значень. Дослідження ряду I на його належність до рядів детерміновано-хаотичних показує, що ряд цей детерміновано-хаотичним не вважається.

Цей ряд слід вважати випадковим, що підтверджують дані на рис.3, де представлена залежність (у вигляді окремих точок) координати послідуючого значення ряду Series (t+1) від попереднього значення Series (t).

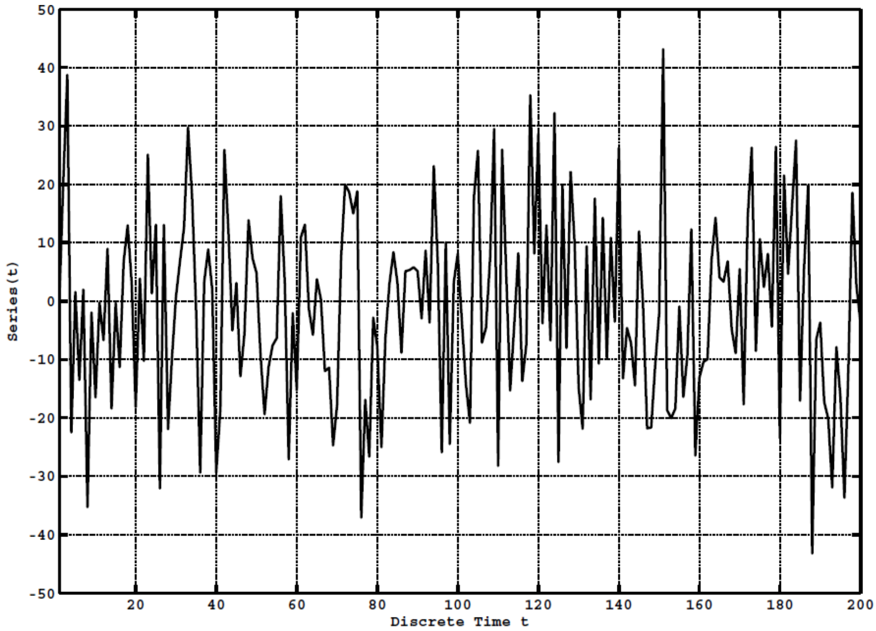

Рисунок 1 **–** Частка ряду *I* (200 точок)
Figure 1 **–** Part of time series *I* (200 points)

Якщо ряд I був дійсно детерміновано-хаотичним, ми повинні були б одержати графік хаотичного аттрактора. Однак в результаті одержали тільки "облако точок" із шаровою симетрією, як це має місце для випадкового ряду із нормальним ймовірнісним розподіленням. Оскільки ряд *I* повністю випадковий, ми можемо навіть говорити про те, що ряд цей можливо віднести до тієї або іншої динамічної системи.

Далі визначимо спектр ряду *I* за допомогою стандартних методів дослідження рядів. Приймемо, що це буде, наприклад, Фур'є-спектр вихідного сигнала, який представлений номером гармоніки *N*, а також, окремо, значеннями *Cos*- та *Sin*-гармонік.

Фур'є-перетворення, як відомо, звичайно використовується частіше за інші перетворення.

Воно входить у вигляді готових процедур у переважну більшість математичних програм типу MATLAB, MAPLE та інших подібних.

В результаті роботи спеціальної процедури одержуємо два ряда, кожний із яких має довжину 5000 значень (точок), тобто ряд *Cos*-гармонік та ряд *Sin*-гармонік (див. нижче). Точковий графік залежності *HSin(N)* від *HCos(N)* відповідних значень гармонік *(N=1 … 5000)* приведений на рис.4. Ці ряди представляють собою відомий хаотичний аттрактор Хенона (1976 рік).

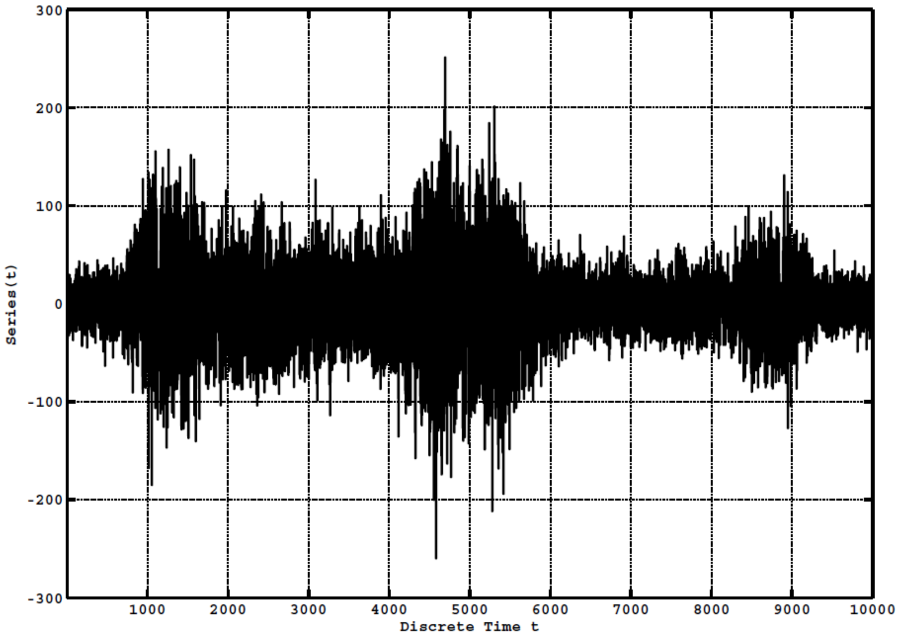

Рисунок 2 **–** Повний ряд *I* довжиною 10000 точок
Figure 2 **–** Entire time Series *I* with a length 10000 points

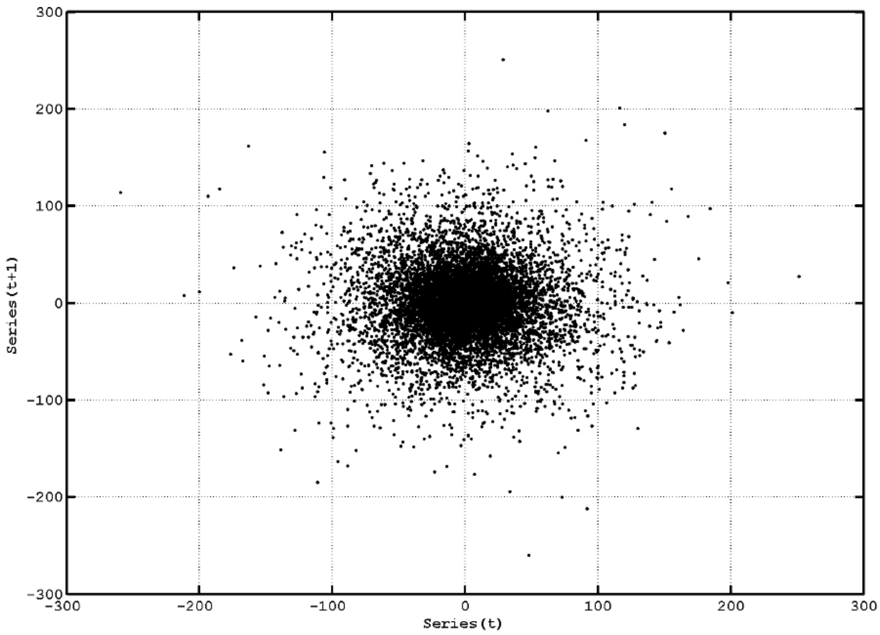

Рисунок 3 **–** Залежність Series (t+1) від Series (t) ряду *I*
Figure 3 **–** Dependence of Series (t+1) on Series (t) for time series *I*

Як показали проведені дослідження, якщо вихідний ряд *Series(t)* не проявляє хаотичної поведінки і є випадковим, ряди *HSin(N)* та *HCos(N)* Фур'є-гармонік вихідного ряду детерміновано-хаотичну поведінку проявляють.

Тобто хаос реалізується не в самій вихідній системі, а в її спектрі.

Далі перейдемо до розгляду другого прикладу.

Розглянемо ряд, який назвемо як ряд *II*.

На рис.5 представлений графік для перших 200 значень (точок) цього ряду *II*.

Відповідно, на рис.6 – графік для всього ряду II довжиною 10000 значень.

Порівнюючи, наприклад, рис.1 та рис.5, можно говорити про те, що ряд *I* та ряд *II* – суттєво це різні ряди.

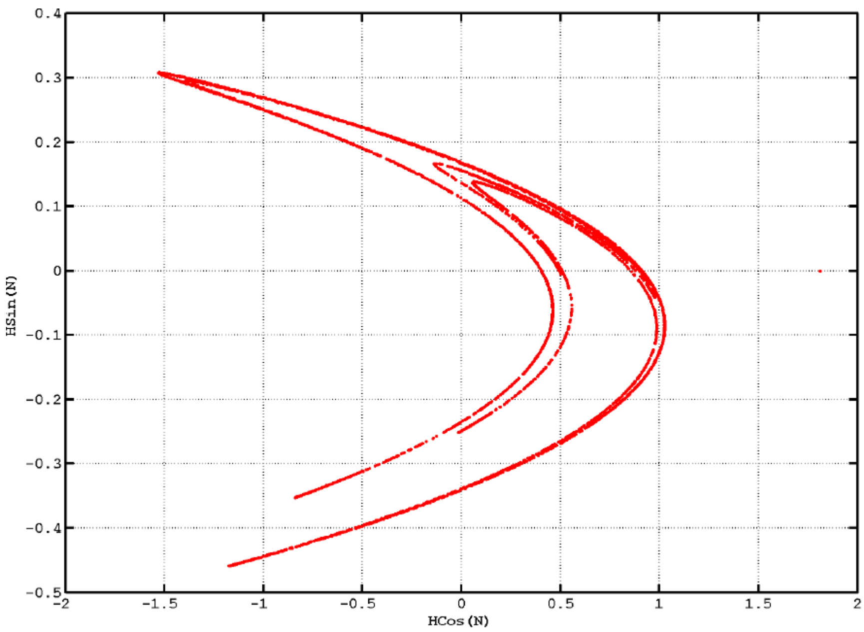

Рисунок 4 **–** Залежність *HSin(N)* від *HCos(N)* для ряду *I*
Figure 4 **–** Dependence of *HSin(N)* on *HCos(N)* for time series ***I***

Проведені дослідження ряду *II* свідчать про те, що цей ряд слід вважати повністю випадковим. Тобто для цього прикладу ми також не можемо говорити, що цей ряд згенерований певною динамічною системою.

В той же час Фур'є-спектр цього випадкового ряду II являє собою приклад типової детерміновано-хаотичної поведінки (дивись рис.8). По-суті, це хаотичний аттрактор Р.Лозі (R.Lozi), 1978.

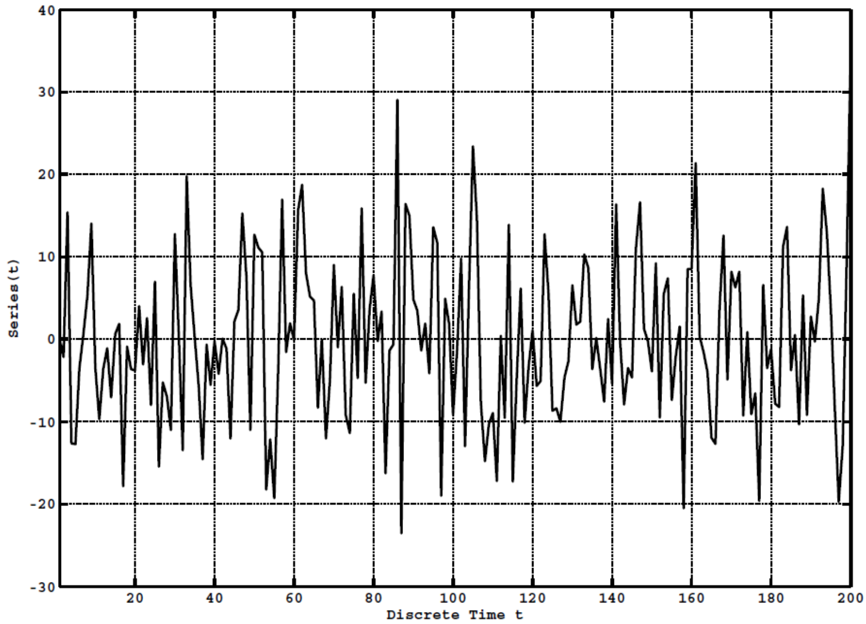

Рисунок 5 – Часкта ряду *II* (200 точок)
Figure 5 – Part of time series *II* (200 points)

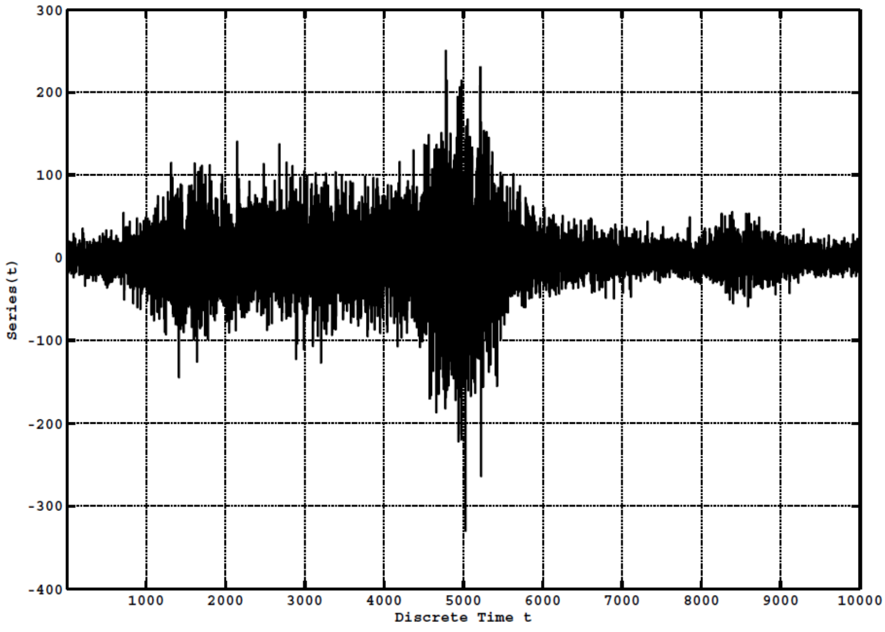

Рисунок 6 – Повний ряд *II* довжиною 10000 точок
Figure 6 – Entire time Series *II* with a length 10000 points

На рис.7 наведена залежність (у вигляді окремих точок) координати слідуючого значення ряду Series (t+1) від його попереднього значення Series (t).

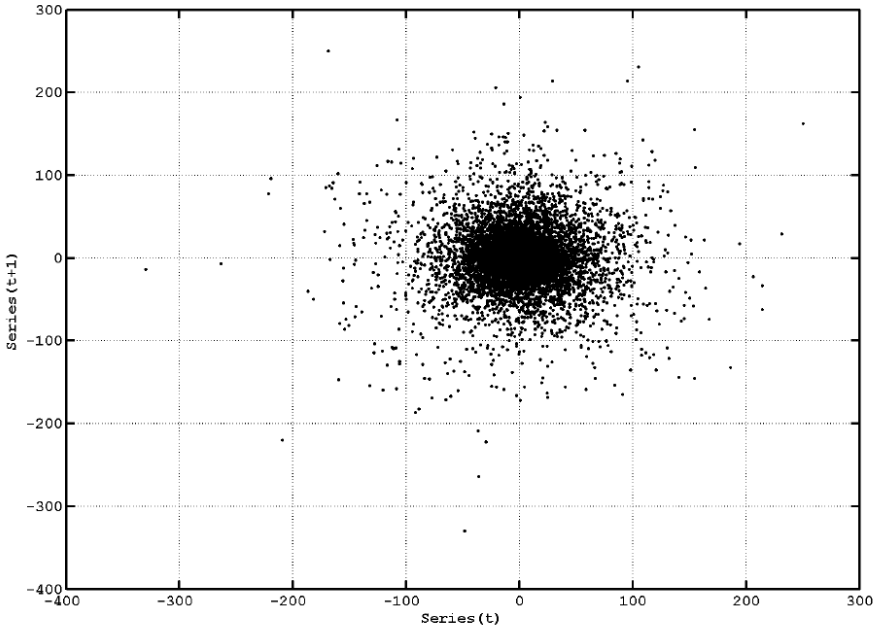

Рисунок 7 **–** Залежність Series (t+1) від Series (t) ряду II

Figure 7 **–** Dependence of Series (t+1) on Series (t) for time series II

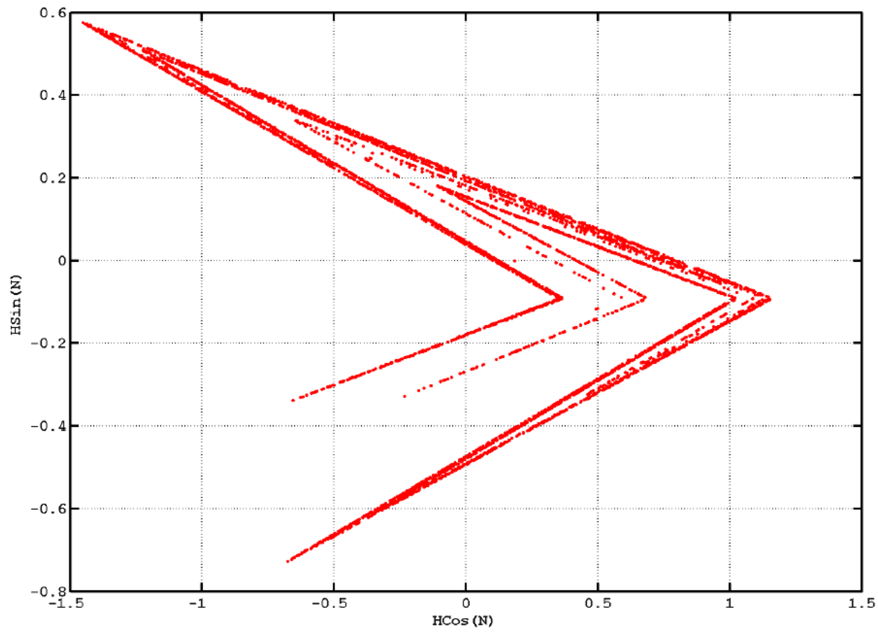

Рисунок 8 **–** Залежність *HSin(N)* від *HCos(N)* для ряду II

Figure 8 **–** Dependence of *HSin(N)* on *HCos(N)* for time series II

Детерміновальний хаос проявляється не в самому вихідному ряді, який є випадковим, а у Фур'є-спектрі цього ряду!

Загальна схема генерації рядів I та II, які були використані у дослідженні

Вихідні ряди *I* та *II* були згенеровані певним чином. Для цього був написаний відповідний програмний код, розроблений авторами на базі процедур $fft()$ та $ifft()$мови MATLAB. Були використані різницеві рівняння (каскади) у якості генераторів хаосу.

Зроблено це виключно з метою максимального спрощення прикладів, оскільки при використанні диференціальних рівнянь (потоків) приклади значно ускладнюються та може загубитися головна мета дослідження.

Попередньо на основі того або іншого динамічного каскада генеруємо відповідні хаотично-детерміновані ряди довжиною, наприклад, 5000 значень (точок).

Для прикладів краще за все використати двохвимірні каскади.

При цьому довжина сгенерованих рядів може коливатись у достатньо широких межах. Координату *1* (першу координату каскада) будемо вважати Cos( ) –гармонікою, а координату 2 – відповідно Sin( ) –гармонікою.

Вибір координат у якості Cos( ) – або Sin( ) –гармонік у загальному випадку є умовним.

Усуваємо із згенерованих рядів середнє значення. Робити це не обов'язково, однак для спрощення прикладів краще це зробити. На основі зворотнього перетворення Фур'є із даних рядів Cos( ) – та Sin( ) –гармонік формуємо вихідний ряд для конкретного прикладу (*I* або *II*).

Далі виконуємо необхідні дослідженя згенерованих рядів.

Слід особливо зазначити, що із позицій детермінованого хаосу Фур'є-перетворення є зручним видом перетворень для одержання спектрів, однак у ряді випадків кращі результати досягаються при використанні вельвет-перетворень, або інших подібних перетворень.

Крім того, Фур'є-перетворення має свій недолік – безкінечній множині різних сигналів може відповідати один і той же Фур'є-спектр.

Однак у даному випадку цей недолік не проявляється. Слід також відмітити, що достатньо важко знайти природній часовий ряд, Фур'є-спектр якого володіє детерміновано-хаотичною поведінкою (наприклад, як у розглянутих вище прикладах). Можливо, що використання будь-яких інших типів спектрів дозволить краще виявляти таку поведінку в природних рядах.

Відмітимо, що у загальному випадку замість спектрів можуть фігурувати інші характеристики сигналу.

Однак у будь-якому випадку хаос *N*–рода (*N*>*1*) повинен проявлятись не в самому вихідному сигналі, а в певній характеристиці цього сигналу.

Висновки

Авторами вперше введено поняття динамічного хаоса принципово нового виду, раніше невідомого, який назвали детермінований хаос "другого роду". Існуючу назву "детермінований хаос" пропонується надалі більш конкретно називати "детермінований хаос першого роду".

Приведено уточнене визначення детермінованого хаоса першого роду.

Детермінований хаос першого роду – це хаос, безпосередньо пов'язаний із детерміновано-хаотичною поведінкою перемінних конкретної динамічної системи. Визначені особливості детермінованого хаосу першого роду та можливі напрямки його генерації.

Детермінований хаос другого роду у загальному випадку не пов'язаний із детерміновано-хаотичною поведінкою динамічних перемінних системи. Цей хаос виникає не в самому вихідному ряді, а в певних проявах його другого плану (наприклад, його Фур'є-спектрі).

Це може бути будь-який спектр, або у загальному випадку навіть відмінна від спектру залежність. При цьому, наприклад, аттрактор Лозі, який може бути реалізований в самій динамічній системі, та аттрактор, що реалізується в спектрі Фур'є другого ряду, – це один і той же математичний об'єкт з точки зору динамічного хаосу.

В результаті проведеного дослідження вперше був "наведений міст" між повністю випадковими системами, типовими об'єктами теорії ймовірності, та системами детермінованими (точніше, хаотично-детермінованими).

Матеріали дослідження свідчать про те, що певна система може бути визначена як випадкова із позицій її перемінних, але в той же час як повністю детермінована (динамічний хаос) із позицій її спектру.

Перелік посилань

1. Автеменко В.А., Петрович В.В. Про прогнозованість гідрологічних часових рядів. – Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, DOI:10.33744/0365-8171-2023-111-126-132, вип. 111. – Київ, 2022. С.126-132.
2. Автеменко В.А., Петрович В.В. Класифікація хаотичних каскадних систем з точки зору екології. – Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, DOI:10.33744/0365-8171-2023-114.1.130-141, вип. 114. Частина 1. Київ, 2023, С.130-141.

A NEW TYPE OF DETERMINISTIC CHAOS: DETERMINISTIC CHAOS OF THE SECOND KIND

Vladuslav Artemenko, ***UT5UDJ,*** Master of Ecology, Ukrainian Hydrometeorological Institute, State Service on Emergencies of Ukraine and National Academy of Science of Ukraine, Hydrochemical Research, Scientific Employee, e-mail: artemenko@uhmi.org.ua, tel. 380936011250, Nauki avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 03028, room 34, https://orcid.org/0000-0003-0536-5415

Volodymyr Petrovych, Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of the Transportation Construction and Property Management Department, National Transport University. e-mail: petrovichvv60@ukr.net**,** tel. +380442807338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1, room 138, https://orcid.org/0000-0003-0422-2535

Abstract. Currently, the phenomena of deterministic (Dynamic) chaos are widely used in science and technology.

Therefore, now the urgent task is to study new phenomena and new manifestations of deterministic chaos.

This paper examines a fundamentally new manifestation of deterministic chaos (Deterministic chaos of the second kind). In this regard, previously known manifestations of deterministic chaos should be called manifestations of chaos of the first kind (The previously known type of deterministic chaos, in our terminology, is chaos of the first kind).

Deterministic chaos of the first kind is chaos that is directly related to the deterministic - chaotic behavior of the dynamic variables of a given dynamic system. At the same time, our work examines the characteristic features of deterministic chaos of the first kind and methods for generating such chaos.

In our work, we considered a fundamentally different type of manifestation of dynamic chaos, namely deterministic chaos of the second kind.

Deterministic chaos of the second kind is not directly related to the deterministic chaotic behavior of the dynamic variables of a dynamic system and can only exist in characteristics that are not directly related to the dynamic variables.

That is, dynamic chaos of the second kind arises only in second-order manifestations: For example, in the Fourier spectrum. In a more general case, this could be any other type of spectrum (Not Fourier) and even another characteristic different from the spectrum. The paper provides two examples of deterministic chaos of the second kind.

The work also proposes a general technique for generating time series demonstrating deterministic chaos of the second kind∗. It is very important that dynamic chaos in the examples given in this work manifests itself not in the time series themselves (Which are completely random) but in the Fourier spectrum of these time series. Thus, the original series itself (The original signal itself) can be random, but at the same time, the spectrum of this series, if considered as another time series, can exhibit deterministic chaotic behavior.

Thus, for the first time we were able to build a bridge between completely random systems and deterministic chaotic systems.

That is, in our work we were the first to show that the same system can be considered both random (From the point of view of the behavior of its variables) and at the same time as deterministic-chaotic (From the point of view of its spectrum or other similar characteristics).

Goal of the work. Study of a newtype of deterministic chaos discovered by the authors (Deterministic chaos of the second kind) and the study of its properties and methods for generating this type of chaos.

Keywords: Deterministic chaos of the second kind, deterministic chaos in the spectrum, generating chaos of the second kind, bridge between completely random systems and deterministic chaotic systems, the same system can be considered both random (Behavior of its variables) and deterministic-chaotic (Its spectrum or other similar characteristics).

References

1. Avtemenko V.A., Petrovych V.V. Pro prohnozovanistʹ hidrolohichnykh chasovykh ryadiv. – Avtomobilʹni dorohy i dorozhnye budivnytstvo, DOI:10.33744/0365-8171-2023-111-126-132, vyp. 111. – Kyyiv, 2022. S.126-132.

2. Avtemenko V.A., Petrovych V.V. Klasyfikatsiya khaotychnykh kaskadnykh system z tochky zoru ekolohiyi. – Avtomobilʹni dorohy i dorozhnye budivnytstvo, DOI:10.33744/0365-8171-2023-114.1.130-141, vyp. 114. Chastyna 1. Kyyiv, 2023, S.130-141.

Дата надходження до редакції 03.10.2023.