

*информационных систем [Текст] / М. В. Евланов, Е. И. Соловьева // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 5/2014 (88). – С. 62–67.*  
22. Левыкин В. М. Параллельное проектирование информационного и программного комплексов информационной системы / В. М. Левыкин, М. В. Евланов, В. С. Сугробов // Радиотехника. – 2006. – Вып. 146. – С. 89–98. 23. COCOMO II Model Definition Manual // Сайт “Center for Systems and Software Engineering”. – [ftp://ftp.usc.edu/pub/soft\\_engineering/COCOMOII/cocomo99.0/modelman.pdf](ftp://ftp.usc.edu/pub/soft_engineering/COCOMOII/cocomo99.0/modelman.pdf).  
24. Functional Point Counting Practices Manual. Release 4.1.1. IFPLUG, Troy, 2001.

УДК 519.7

**Р. М. Камінський, Г. В. Бігун**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра інформаційних систем та мереж

## **ПОБУДОВА РЕКУРЕНТНИХ ДІАГРАМ КОРОТКИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ ЗАСОБАМИ MS EXCEL**

© Камінський Р. М., Бігун Г. В., 2015

**Розкрито поняття рекурентної діаграми як матриці близькості між зображальними точками фазового портрета на фазовій площині для коротких часових рядів. Наведено формули побудови рекурентних діаграм та результати застосування запропонованого методу побудови рекурентних діаграм у середовищі табличного процесора MS Excel. Як ілюстративний матеріал використано три типи сигналів: гармонічний, меандр і трикутний та ці самі сигнали з накладеним на них рівномірним шумом. Результати мають істотне практичне значення, оскільки метод рекурентних діаграм ще не набув поширення в Україні, проте легко реалізується в табличному середовищі.**

**Ключові слова:** нелінійна динаміка, часові послідовності, рекурентні діаграми, матриця близькостей, MS Excel.

**The recurrence plot concept was disclosed as a proximity matrix between phase space depicting points on phase area for time series. Recurrence plots construction equations and application results of suggested method are given in the MS Excel. Three types of signals: harmonic, meanders, triangular are used as a graphical material and even noise distribution is imposed on this signals. Results have significant practical value, because recurrence plots method is not widely spread in Ukraine, however it is easy to implement in spreadsheet.**

**Key words:** nonlinear dynamics, time series, recurrence plots, proximity matrix, MS Excel.

### **Вступ**

У різноманітних сферах людської діяльності є системи, які характеризуються своєю поведінкою з погляду її складності, динамічності, особливостей процесів, що відбуваються в цій системі. Такі системи опосередковано чи безпосередньо впливають на діяльність людей, навколишнє середовище, а тому необхідно і важливо вивчати, досліджувати і моделювати їх динаміку та передбачати їх поведінку з плином часу. Складні динамічні системи переважно характеризуються нерегулярною динамікою поведінки, проявами якої є як випадкові, так і детерміновані хаотичні процеси. Спостереження за такими системами та їх експериментальні дослідження подаються часовими рядами – дискретною послідовністю випадкових величин, що є

значеннями відповідних показників, впорядкованих за часом їх отримання, які характеризують стан об'єкта спостереження в окремі моменти часу. Інакше кажучи, сукупність таких вимірів (показників) упродовж певного періоду часу являє собою часовий ряд. Основною метою аналізу часових рядів є отримання інформації про властивості й механізм системи, яка генерує цей ряд. Саме вони і є основою моделювання таких систем. Часові ряди – це дискретні послідовності чисел, які розподілені регулярно або випадково в часовому інтервалі спостереження за системою. Кожному числу відповідає момент його спостереження, тобто ці числа впорядковані відносно поточного часу функціонування системи. Такий спосіб представлення інформації про явища, еволюційні процеси, рухи та динаміку досліджуваної системи є дуже поширеним і зручним. У деяких випадках дискретні спостереження або вимірювання є цілком природними або й навіть єдиним можливим способом збирання інформації про систему, а в інших – дискретність використовується для даних у задачах попереднього моделювання, прогнозування та отримання наближених оцінок функціональної придатності системи або пов'язана з вибором способу спостереження.

За останні десятиліття арсенал статистичних методів обробки та аналізу експериментальних даних істотно поповнився методами нелінійної динаміки. Принципи роботи з такими методами, подані у літературних джерелах, вказують на те, що більшість методів нелінійної динаміки потребують доволі довгих і стаціонарних часових рядів, за винятком, хіба що, методу рекурентного аналізу. Застосування статистичних методів для роботи з часовими рядами певною мірою забезпечує адекватність побудованої моделі досліджуваному явищу, процесу чи об'єкту, проте подати динаміку розвитку ними доволі проблематично. Статистичні методи дають змогу успішно розв'язувати задачі визначення форми і тісноти зв'язку між факторами і результативними показниками, дають кількісні оцінки та якісні характеристики об'єктів.

Для проведення рекурентного аналізу під час дослідження динамічних систем не потрібно великого обсягу первинних даних, достатньо часового ряду даних одного вимірювального експерименту. Рекурентні діаграми, отримані в процесі аналізу часових рядів, мають у своїй основі геометричну структуру. Основна діагональ на рекурентній діаграмі має вигляд чорної діагональної лінії – лінії ідентичності. Окремі точки на діаграмі не несуть ніякої інформації, однак у сукупності дозволяють реконструювати властивості досліджуваного процесу.

Досліджуючи процеси з використанням рекурентних діаграм, розглядають два типи структур: топологію і текстуру. Топологія, яка відповідає великомасштабним структурам, дає загальне уявлення про характер процесу і зараховує його в такі класи: однорідні, періодичні, дрейф і білі області. Текстура характеризує дрібномасштабну структуру діаграми і складається з окремих точок та діагональних, горизонтальних і вертикальних ліній.

### **Загальна постановка проблеми**

В останні десятиліття арсенал інформаційної технології математичного опису усього різноманіття природних явищ, яка ґрунтувалась на лінійній парадигмі, тобто на мові класичних (лінійних) моделей математичної статистики, поповнився новими методами, запозиченими з нелінійної динаміки. Це методи фрактального аналізу, методи аналізу фазових портретів, кількісний рекурентний аналіз, метод рекурентних діаграм та інші.

У реальних наукових дослідженнях отримати довгі часові ряди доволі складно, оскільки, з одного боку, для прийняття рішень досить часто потрібна висока оперативність, а це автоматично скорочує тривалість дослідження і відбору даних. З іншого боку, досліджуваний об'єкт може за короткий час суттєво змінити свій стан і отримані результати не можуть бути об'єднані в одну стаціонарну послідовність.

Тому, за таких ситуацій, виникає потреба розроблення нового інструментарію та відповідної методології, основаної на фундаментальних властивостях дисипативних динамічних систем, які б не ставили особливих вимог до даних і забезпечили б задовільні результати. Одним з таких інструментів, який зараховують до методів нелінійної динаміки, є метод рекурентних діаграм. Цей метод застосовний до коротких і нестационарних рядів, що є його істотною перевагою над іншими методами нелінійного аналізу.

Проблема рекурентних діаграм полягає в тому, що ще немає строго визначеної методології їх побудови, а також недостатньо чітко визначено сферу застосування рекурентних діаграм, умови, за яких вони дають найефективніші й добре інтерпретовані результати. Програмне забезпечення, наприклад, таке, як запропоноване в [1], доволі складно освоїти, а пакети спеціально розроблені для аналізу часових рядів, наведені в [2], не розраховані на рекурентний аналіз та побудову рекурентних діаграм.

Однак застосування методу рекурентних діаграм має важливе значення, оскільки на відміну від звичайного подання часового ряду графіком у декартовій системі координат як характерних особливостей послідовності, значень рівнів та їхньої тенденції, рекурентні діаграми дають інформацію про іншу його характеристику – поведінку в фазовому просторі.

### **Аналіз останніх досліджень**

Сьогодні для вивчення властивостей складних систем, зокрема й експериментальних досліджень, широко використовується підхід, оснований на аналізі сигналів системи. Це актуально у випадках, коли математично описати досліджуваний процес практично неможливо, але є характерна спостережувана величина. Тому аналіз систем здійснюють засобами обробки сигналів. Зазвичай такий сигнал називають спостережуваним, він являє собою часовий ряд, а метод дослідження – реконструкцією динамічних систем.

Рекурентна поведінка, як-от періодичність або іррегулярна циклічність, притаманна як природним системам, так і для складним системам, створеним людиною. Рекурентні діаграми, які запропонували в 1987 р. Екман, Кампхорст і Рюел [3], дозволяють відобразити фазову траєкторію будь-якої розмірності на двовимірну двійкову квадратну матрицю, розмір якої визначається довжиною часового ряду  $i$ , фактично, відбиває його рекурентність як “погляд в минуле”, тобто його поведінку в минулі моменти часу. Окрім потужних візуальних властивостей, існує метод кількісного аналізу структур, які формуються на зображенні рекурентної діаграми. Сучасні дослідження показали, що рекурентна діаграма містить всю необхідну інформацію про динаміку системи. Роботи таких вчених, як Джо Збілут [4], Норберт Марван [5], Марко Тіль [6], Кармен Романо [7] та ін., істотно збагатили за останнє десятиліття можливості цього методу.

У [8] коротко розглянуто метод аналізу характеру процесів – рекурентний аналіз та реконструкції фазового простору з одновимірного часового ряду. Наведено огляд можливих застосувань методу, а також запропоновано інформаційні моделі систем з використанням рекурентного аналізу. Перспективний метод аналізу процесів, а саме метод рекурентних діаграм, розглянуто в [9]. Наведено рекурентні діаграми системи Лоренца, принципи їх побудови, класифікацію параметрів та здійснено кількісний аналіз обчислення мір складності геометричних структур рекурентних діаграм запропонованими методами. Теорію та методи рекурентного аналізу досліджено у [10], визначено оптимальні значення вхідних параметрів та відповідні міри для аналізу фінансових часових рядів з метою побудови інструменту моніторингу ринків. Метод нелінійного аналізу процесів у телекомунікаційних системах з використанням рекурентних діаграм розглянуто в [11]. Тут подано методи реконструкції фазового портрета процесу на основі часового ряду та побудови рекурентних діаграм, а також наведені результати кількісного аналізу структур рекурентних діаграм. Подано зв'язок рекурентних діаграм з фрактальним показником самоподібності Герста. В [12] аналізується можливість використання рекурентного аналізу для виявлення сигналів та обробки спостережень. Показано, що наявність шуму в спостереженнях погіршує якість виявлення сигналів із використанням квантифікацій (числових характеристик) рекурентних діаграм. Проілюстровано, що традиційний числовий аналіз квантифікацій рекурентних діаграм можна доповнити використанням BDS-статистики, яка не спирається на властивості шуму спостереження. Наведений синтезований алгоритм опрацювання різних класів сигналів з використанням рекурентного аналізу. Спосіб кількісної оцінки фазової траєкторії досліджуваного процесу за допомогою рекурентних діаграм і їх кількісного аналізу запропоновано у [13] та наведено результати застосування цього способу до модельних і реальних систем, для цього подано оцінку можливостей його використання. Використання рекурентного аналізу для моделювання і

прогнозування нелінійних динамічних властивостей складних систем розглянуто в [14]. Наведено поняття реконструкції фазового простору, рекурентного аналізу, рекурентних діаграм та їхніх характеристик, зокрема таких як однорідність топології, дрейф, осцилювальна поведінка системи, контрастна топологія, контрастна топологія, ламінарність процесу. Крім того, наведені приклади візуального аналізу рекурентних діаграм та в окремому розділі розглянуто кількісний аналіз рекурентних діаграм.

Також варто зазначити, що сам по собі рекурентний аналіз – багате поле для досліджень як самого методу, так і аспектів його застосування.

### Формулювання мети статті

Основною рисою, яка виділяє аналіз часових рядів серед інших видів статистичного аналізу, є суттєвість порядку, в якому відбуваються спостереження. Виявлення закономірностей зміни рівнів ряду і побудова його моделі з метою прогнозування і вивчення взаємозв'язків між явищами є метою дослідження часового ряду.

Метою статті є вивчення можливостей використання засобів MS Excel для побудови рекурентних діаграм коротких часових послідовностей.

### Поняття рекурентної діаграми та її властивості

Суть рекурентних діаграм полягає у візуалізації функціональної діяльності та динаміки систем на основі даних спостереження, що дає змогу зрозуміти основні властивості та структури, відображені спостережуваними даними.

Опис динамічних систем, тобто систем, в яких з часом змінюються параметри, здійснюють, описуючи зміни їх станів, вказуючи функціональну залежність стану системи від значень на її входах у конкретні моменти часу. В математичному сенсі будь-яку динамічну систему можна подати як рух зображальної точки у фазовому просторі – просторі станів. Основною характеристикою такого простору є його розмірність. Розмірність фазового простору визначається кількістю величин, що характеризують стан системи. Кожна з цих величин є фазовою координатою у цьому просторі, а їх сукупність утворює вектор, який і описує стан системи. Кожному стану системи відповідає певна точка фазового простору – зображувальна точка. Послідовність цих точок у фазовому просторі відображає рух системи або, точніше, зміну станів системи, відповідає деякій траєкторії, яку називають фазовою траєкторією. Проекція фазової траєкторії на фазову площину утворює фазовий портрет. Графічне зображення фазової траєкторії дає характеристику поведінки системи.

Під час дослідження складних систем доволі часто їх можна охарактеризувати навіть єдиним спостережуваним показником, виміряним у дискретні моменти часу  $\Delta t$ , оскільки заміряти інші показники фактично або неможливо, або дуже складно. Інтервал  $\Delta t$  може бути постійною величиною або випадковою, хоча в останньому випадку це створює додаткові й часом значні труднощі щодо опрацювання спостережуваних даних.

Взаємодії у складних системах є такими, що отримана фазова траєкторія, в якій зберігається структура оригінальної фазової траєкторії, може бути відновлена, відповідно до теореми Такенса [15], з одного часового ряду методом часової затримки. Тобто, якщо маємо часовий ряд  $X(t) = x(t_1), x(t_2), \mathbf{K}, x(t_n)$ , то, використовуючи метод затримки, наприклад, у нашому випадку  $\Delta t = 1$ , отримуємо ряд  $X(t) = x(t_1 + \Delta t), x(t_2 + \Delta t), \mathbf{K}, x(t_n + \Delta t)$ . Пари значень  $\langle x(t_i); x(t_i + \Delta t) \rangle$  є фазовими координатами зображальної точки на фазовій площині, яка відображає фазову траєкторію станів системи. Графічно динаміка системи в обмеженій області фазової площини подається зображенням фазових траєкторій. У 1890 р. А. Пуанкаре опублікував сформульовану ним теорему рекурентності, а саме: *якщо система зводить свою динаміку до обмеженої підмножини фазового простору, то система майже напевно, тобто з вірогідністю, яка фактично дорівнює одиниці, як завгодно близько повертається до певного наперед заданого режиму.* Суть цієї фундаментальної

властивості полягає в тому, що через деякий час система прагне повернутися до деякого стану, певною мірою близького до минулого, і проходить при цьому подібні стани еволюції [12].

Відображення  $m$ -вимірної фазової траєкторії станів процесу  $X(t)$  на двовимірну квадратну двійкову матрицю  $n \times n$ , в якій  $\mathbf{1}$  (одиниця) відповідає повторенню стану, тобто стани на момент  $t_i$  і в момент  $t_j \in$  (майже) еквівалентні, а координатні осі є осями часу, називають рекурентною діаграмою.

Рекурентна діаграма описується таким співвідношенням

$$\mathbf{R}_{i,j}^{m,e} = \Theta\left(e_i - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|\right),$$

де  $\{\mathbf{x}_i\} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \mathbf{R}^m$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – кількість розглянутих станів, тобто кількість зображальних точок;  $e_i$  – розмір околу точки  $\mathbf{x}_i$  в момент  $i$ ;  $\|\cdot\|$  – норма (відстань) і  $\Theta(\cdot)$  – функція Гевісайда. Форма околу, що характеризується параметром  $e_i$ , визначається типом вибраної норми і центрована відносно точки  $\mathbf{x}_i$ , тобто радіус околу в фазовому просторі з центром в точці  $\mathbf{x}_i$ . У випадку одновимірного часового ряду замість околу фігурує інтервал із серединою в точці  $\mathbf{x}_i$ . Якщо точка  $\mathbf{x}_j$  виявляється в середині цього околу, то такий стан  $\mathbf{x}_j$  вважається подібним до стану  $\mathbf{x}_i$ , і на діаграмі ставиться точка  $\mathbf{R}_{i,j} = 1$ . Радіус  $e_i$  може бути постійним для всіх  $x_i$ , а може визначатися для кожної точки окремо, щоб в отриманий окіл завжди потрапляла визначена кількість подібних станів. Переважно використовується постійне значення  $e_i$ , що призводить до отримання симетричної рекурентної діаграми відносно лінії  $\mathbf{R}_{i,j} = 1$ , якщо  $(i = j)$  – головна діагональ матриці відстаней.

Рисунок рекурентної діаграми відображає поведінку процесу в часі й дає підстави для висновків щодо його характеру за її топологією і текстурою.

### Побудова рекурентної діаграми у середовищі табличного процесора MS Excel

Для ілюстрації методу побудови рекурентної діаграми засобами табличного процесора MS Excel згенеровано три часові ряди, форма яких відповідає гармонічному, трикутному та меандровому сигналам у той спосіб, що значення в часовому ряді повторюються повними циклами. Обсяг цих рядів становив  $N = 100$ , а їхні значення належать інтервалу  $[-1, 1]$ .

Реалізація цього методу побудови рекурентних діаграм у середовищі табличного процесора MS Excel здійснювалась під час експериментальних досліджень операторського персоналу, в сенсі ідентифікації операторів, на підставі індивідуальних часових рядів значень часу розпізнавання в послідовності зображень-тестів об'єктів заданого класу, випадково локалізованих на цих зображеннях. Тому значення цих сигналів були зведені до величин, порівнюваних зі значеннями індивідуальних часових рядів, тобто приведені до інтервалу  $[300 \div 900 \text{ ms}]$  вилученням від'ємних значень – додаванням додатного числа, що дорівнює максимальному значенню від'ємного числа, і множенням кожного з отриманих значень на величину з цього інтервалу.

**Побудова фазових портретів.** Генеровані часові ряди зі значеннями з інтервалу  $[-1, 1]$  на рис. 1 у першому стовпчику робочої книги починаються з комірки **A3**. Для побудови фазових портретів таких часових рядів для кожного з них здійснено затримку  $\Delta t = 1$ , тобто поряд з кожним таким рядом розміщений цей самий ряд, але зміщений відносно себе на одне значення.

На робочому аркуші робочої книги MS Excel генеровані значення представлені величинами, наближеними до значень, які збігаються зі значеннями реальних часових рядів, отриманими в окремому експериментальному дослідженні, власне для них досліджується можливість побудови рекурентних діаграм засобами MS Excel. Для цього значення  $X_{\text{гарм}}(t)$ ,  $X_{\text{меандр}}(t)$  та  $X_{\text{трик}}(t)$  приведені до  $\mathbf{Z}^+$  множини цілих додатних чисел, з використанням такої формули

$$=(A3 + ABS(МИН(A3:A103)))*C, \quad (1)$$

де **A3** – комірка, в якій міститься значення  $x_1$  – перше згенероване випадкове значення з інтервалу  $[-1, 1]$ , **МИН(A3:A103)** – найменше значення у згенерованому часовому ряду, **C** – константа, в цьому випадку  $C = 500$ .

Отже, ряди представлені в просторі  $\mathbf{R}_{i,j}^{1,e}$ . Крім того, побудовані фазові портрети цих рядів. Для побудови фазових портретів дані оригінального і зсунутого ряду дають пари значень  $\langle x(t_i); x(t_{i+1}) \rangle$  як координати зображальної точки дискретної фазової траєкторії на фазовій площині. За допомогою **Майстра діаграм**, використовуючи вкладку *Стандартні* й тип діаграми **Точкова**, отримано фазові портрети, зображені на рис. 1.

**Побудова рекурентної діаграми** здійснюється за тими самими даними, що використані для побудови фазових портретів. Відмінність полягає у тому, що записують їх у робочій книзі MS Excel два рази, тобто перший і третій стовпчики та другий і четвертий є ідентичними, як показано на рис. 2. На цьому рисунку справа виділено місце для матриці близькостей – зображення рекурентної діаграми. В цьому випадку це має істотне значення, оскільки рекурентна діаграма одновимірного часового ряду є фактично матрицею близькості між зображальними точками на фазовій площині. Аналогом радіуса  $e_i$  околу точки  $\overset{\bullet}{x}_i$  є відстань  $d_{i,j}$  між точкою з координатами  $\langle x_i; x_{i+1} \rangle$  і точками з координатами  $\langle x_{i+j}; x_{i+1+j} \rangle$ , що належать зсунутому ряду.

Як аналітичну функцію для обчислення відстані в цьому дослідженні використано відстань Евкліда  $D_{Евкл} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$ , де  $N$  – кількість рівнів часового ряду, а  $\overset{\bullet}{x}$  і  $\overset{\bullet}{y}$  – порівнювані вектори координат.

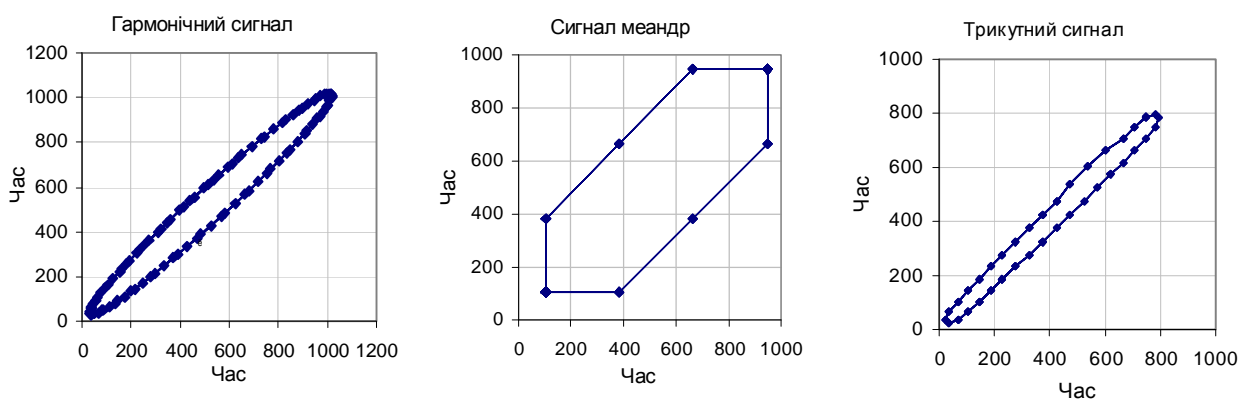


Рис. 1. Фазові портрети ілюстраційних процесів

На відміну від матриці близькості, рекурентна діаграма містить лише ті значення відстані, які належать інтервалу  $e_i$ , але подає їх не обчисленими числовими значеннями, а двійковими логічними символами, тобто відстань  $d_{i,j}$  між точкою  $x_i$  і  $x_j$  подається як предикат

$$d_{i,j} = \begin{cases} 1, & d_{i,j} \leq e, \\ 0, & d_{i,j} > e, \end{cases} \quad (2)$$

де  $e$  – заданий інтервал.

Оскільки матриця близькості є симетричною відносно головної діагоналі, то і рекурентна діаграма має таку свою діагональ, тільки відмінність між ними в тому, що на головній діагоналі матриці розташовані нулі (відстань між цим елементом і ним самим дорівнює нулю), а на головній діагоналі рекурентної діаграми розташовані створені в табличному процесорі MS Excel одиниці (як результат значення предикату).

Отже, для побудови рекурентної діаграми необхідно подати даний часовий ряд так, як для побудови фазового портрета, тобто змістити ряд відносно себе самого і прийняти значення цього ряду за координати незалежної змінної вздовж осі абсцис, а значення зміщеного ряду прийняти за значення координат залежної змінної вздовж осі ординат. Зауважимо, що в цьому випадку кількість зображувальних точок буде  $N - 1$ , за рахунок втрати одного рівня у разі зсування ряду, першого чи останнього.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
1																			
2																			
3	0.361609	606							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	0.17201	511	606		511	606		1											
5	-0.02445	413	511		413	511		2											
6	-0.21993	315	413		315	413		3											
7	-0.40664	222	315		222	315		4											
8	-0.57714	136	222		136	222		5											
9	-0.72464	63	136		63	136		6											
10	-0.84324	3	63		3	63		7											
11	-0.92823	-39	3		-39	3		8											
12	-0.97621	-63	-39		-63	-39		9											
13	-0.98527	-68	-63		-68	-63		10											

Рис. 2. Локалізація даних на робочому аркуші MS Excel

**Метод побудови рекурентної діаграми.** Метод полягає у реалізації на робочому аркуші MS Excel певних операцій і може бути відповідно проілюстрований такими кроками.

**Крок 1.** Нехай ряд  $X(t) = \{x_1, x_2, \mathbf{K}, x_N\}$  розміщений в стовпчику **B** так, що  $x_1 = \mathbf{B3}$ ,  $x_2 = \mathbf{B4}$ ,  $x_3 = \mathbf{B5}$  і т. д. У стовпчику **C** розмістимо “зміщений” часовий ряд  $X(t + \Delta t)$  так, що  $x_1 = \mathbf{C4}$ ,  $x_2 = \mathbf{C5}$ ,  $x_3 = \mathbf{C6}$  і т.д. Пари значень  $\mathbf{B}(i)$  і  $\mathbf{C}(i)$  є відповідно абсцисою та ординатою зображувальної точки на фазовому портреті. Очевидно, що таких пар є  $N - 1$ . Скопіюємо ці два стовпчики як пари координат зображувальних точок і вставимо їх копію поруч, як зображено на рис. 2, тобто починаючи з комірок **E4** і **F4**.

**Крок 2.** Для побудови рекурентної діаграми потрібно знайти значення предиката (2), визначаючи відстань  $d_{i,j}$  від кожної зображувальної точки з координатами  $(\mathbf{B}(i); \mathbf{C}(i))$  до кожної зображувальної точки з координатами  $(\mathbf{E}(j); \mathbf{F}(j))$ , де  $i, j \in [4, N - 1]$ . Саме використання обох стовпчиків пар  $(\mathbf{B}(i); \mathbf{C}(i))$  і  $(\mathbf{E}(j); \mathbf{F}(j))$  забезпечує визначення відстані  $d_{i,j}$  між зображувальними точками та дає змогу порівняти її величину з наперед заданою величиною  $\epsilon$ . Для цього використовуємо формулу, яка забезпечує обчислення значення відстані Евкліда та порівнює його зі значенням величини  $\epsilon$

$$=\text{ЕСЛИ}(\text{КОРЕНЬ}((\mathbf{B}\mathbf{4}-\mathbf{E}\mathbf{4})^2+(\mathbf{C}\mathbf{4}-\mathbf{F}\mathbf{4})^2)<\epsilon;1;0), \quad (3)$$

яку поміщаємо в комірку **H3**. За допомогою автозаповнення обчислюємо  $N - 1$  значення для стовпчика **H**, тобто отримуємо послідовність нулів і одиниць у межах **H3:H(N - 1)**.

**Крок 3.** Копіюємо формулу (2) з комірки **H3** і вставляємо її в комірку **I3**. Оскільки усі відстані між точкою  $(\mathbf{B4}; \mathbf{C4})$  і всіма іншими точками, враховуючи і цю точку, визначені й містяться в стовпчику **H**, переходимо до точки  $(\mathbf{B5}; \mathbf{C5})$ . Для цього виконаємо в формулі (3) заміну  $\mathbf{B}\mathbf{4}$  і  $\mathbf{C}\mathbf{4}$  на  $\mathbf{B}\mathbf{5}$  і  $\mathbf{C}\mathbf{5}$

$$=\text{ЕСЛИ}(\text{КОРЕНЬ}((\mathbf{B}\mathbf{5}-\mathbf{E}\mathbf{4})^2+(\mathbf{C}\mathbf{5}-\mathbf{F}\mathbf{4})^2)<\epsilon;1;0), \quad (4)$$

Далі, використовуючи автозаповнення, отримаємо значення відстаней від точки (B5;C5) до всіх інших точок. Перебираючи в такий спосіб точки, отримуємо зображення рекурентної діаграми, фрагмент якої зображений за допомогою нулів і одиниць на рис. 3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1																		
2																		
3	0.361609	606							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	0.17201	511	606					1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	-0.02445	413	511	606				2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	-0.21993	315	413	511	606			3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	-0.40664	222	315	413	511	606		4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	-0.57714	136	222	315	413	511	606	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	-0.72464	63	136	222	315	413	511	6	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
10	-0.84324	3	63	136	222	315	413	7	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
11	-0.92823	-39	3	63	136	222	315	8	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
12	-0.97621	-63	-39	3	63	136	222	9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
13	-0.98527	-68	-63	-39	3	63	136	10	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Рис. 3. Фрагмент рекурентної діаграми.

Що менша дисперсія і гладший тренд, то меншою буде відстань  $e$ . З іншого боку, що меншим є  $e$ , то менше клітинок діаграми буде зайнято одиничками.

Рекурентні діаграми побудовані в середовищі табличного процесора MS Excel, мають вигляд, зображений на рис. 4. Деякі артефакти на зображенні рекурентних діаграм є результатом стискання зображення, оскільки вони самі є таблицями, а не зображеннями.

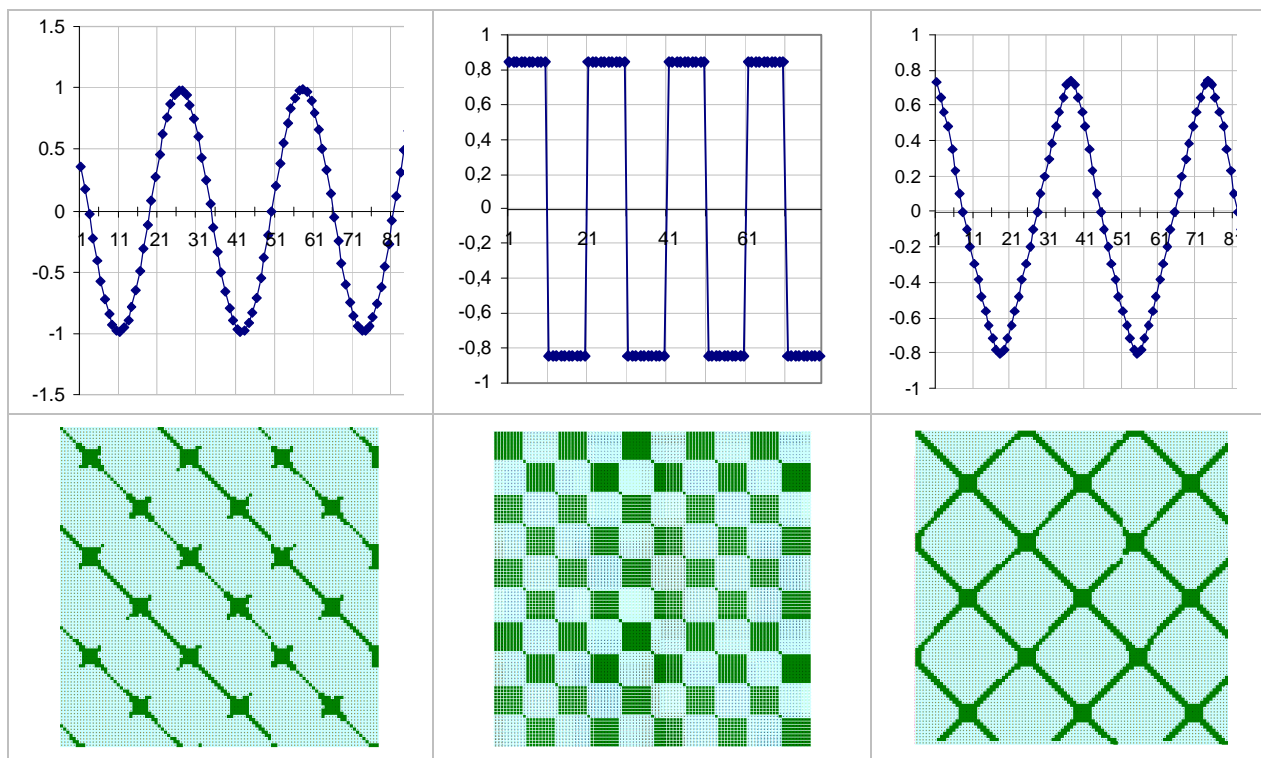


Рис. 4. Рекурентні діаграми, отримані засобами MS Excel



Для підтвердження правомірності використання методу за його реалізації у середовищі MS Excel побудовані часові ряди з адитивним шумом і для них також рекурентні діаграми. Для цього до значень отриманих первинних сигналів з інтервалом значень  $[-1, +1]$  додано сигнал, утворений послідовністю випадкових чисел, рівномірно розподілених у межах інтервалу  $[-0.1, +0.1]$  за допомогою того самого вбудованого в MS Excel генератора псевдовипадкових чисел, що був використаний для створення первинних сигналів. Інакше кажучи, цей сигнал додатних та від'ємних випадкових чисел обсягом у 100 рівнів накладено на первинний сигнал так, щоб індекси їхніх значень (рівнів) збігалися. Далі проведено процедуру за формулою (1).

Результати використання накладеного на часові ряди шуму наведені на рис. 5.

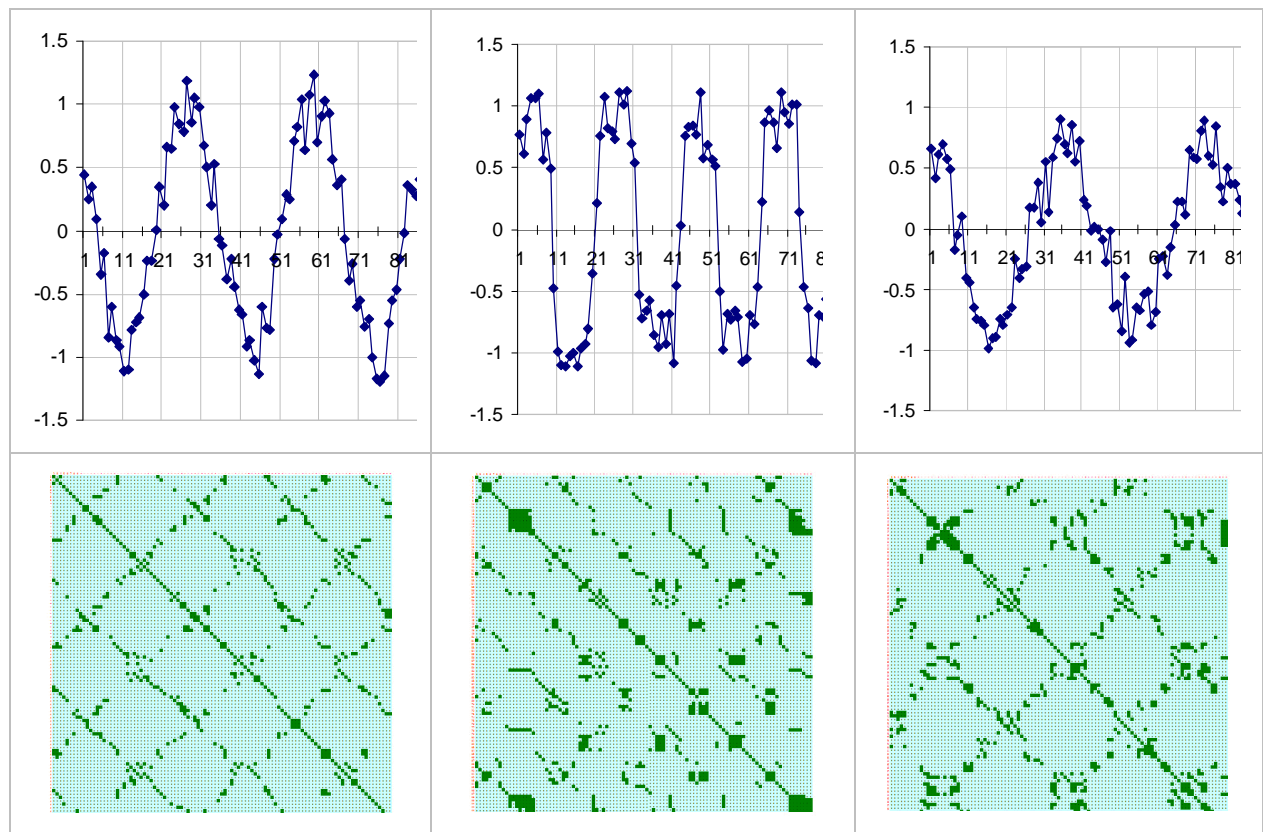


Рис. 5. Рекурентні діаграми спотворених шумом часових рядів

Можна стверджувати, що отримані рекурентні діаграми засобами MS Excel подібні до діаграм, наведених у літературних джерелах для хаотичних часових рядів.

### Висновки та перспективи подальших наукових розвідок

Застосування табличного процесора MS Excel для аналізу коротких часових рядів є правомірним, істотно доповнює арсенал методів їх опрацювання, аналізу та моделювання. Крім того, наведений підхід розкриває спосіб побудови рекурентних діаграм, що теж може бути використано і для розроблення програмного забезпечення спеціальних та загальних інформаційних технологій. Отже, засоби MS Excel можна використовувати для побудови рекурентних діаграм коротких часових послідовностей.

1. Marwan N. *Software / Programmes. Commandline Recurrence Plots* [Електронний ресурс] / No. Marwan. – 2007. – Режим доступу до ресурсу: <http://tocsy.pik-potsdam.de/commandline-gr.php>.
2. Иващенко А. Б. Рынок программного обеспечения для анализа временных рядов / А. Б. Иващенко // Системний аналіз та інформаційні технології у науках про природу та суспільство. – 2012. – № 1(2)–2(3). – С. 165–169.
3. Eckmann J. P. *Recurrence plots of dynamical systems* / J. P. Eckmann, O. Kamphorst, D. Ruelle // *Europhys. Lett.*, 4. – 1987. – P. 973–977.
4. Zbilut J. P. *Recurrence Quantification Analysis: Introduction and Historical Context* / J. P. Zbilut,

C. L. Webber // *Int. J. Bifurcation Chaos*. – 2007. – № 17. – P. 10. 5. Marwan N. A historical review of recurrence plots / N. Marwan // *The European Physical Journal Special Topics*. – 2008. – № 164 (1). – P. 3–12. 6. Zou Y. Inferring direct coupling by means of recurrences / Y. Zou, M.C. Romano, M. Thiel, M. Marwan, J. Kurths // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2011. – № 21(4). – P. 1099–1111. 7. Thiel M. Generating surrogates from recurrences / M. Thiel, M.C. Romano, J. Kurths, M. Rolf, R. Kliegl // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical & Engineering Sciences* / В. Б. Киселев. – 2008. – № 366(18650). – P. 545–557. 8. Киселев В. Б. Рекуррентний аналіз – теорія і практика / В. Б. Киселев // *Научно-технічний вісник СпбГУ / ИТМО*. – 2006. – Вып. 6(29). – С. 118–127. 9. Киселев В. Б. Некоторые методы нелинейного анализа / В. Б. Киселев // *Научно-технічний вісник інформаційних технологій, механіки і оптики СпбГУ ИТМО*, 2005, Вып. 4(20). – С. 172–180. 10. Піскун О. В. Особливості застосування рекуррентних діаграм і рекуррентного кількісного аналізу для дослідження фінансових часових рядів / О. В. Піскун // *Фінансовий простір*. – 2011. – № 3 (3). – С. 111–118. 11. Васюта К. С. Рекуррентний аналіз процесів в телекомунікаційних системах / К. С. Васюта // *Наукові записки УНДІЗ*, 2008.– № 6 (8). – С. 90–96. 12. Васюта К. С. Розвиток методів виявлення радіосигналів в радіотехнічних системах із використанням рекуррентного аналізу / К. С. Васюта, О. Б. Танцюра, О. В. Ревін // *Наука і техніка Повітряних сил Збройних сил України*. – 2013. – № 2(11). – С. 135–139. 13. Киселев В. Б. Определение стабильности траектории процесса в фазовом пространстве при помощи рекуррентного анализа / В. Б. Киселев // *Научно-технічний вісник інформаційних технологій, механіки і оптики СпбГУ ИТМО*. – 2007. – Вып. 6(40). – С. 121–130. 14. Соловійов В. М. Моделювання складних економічних систем: навч. посіб. / В. М. Соловійов, В. В. Соловійова, Н. А. Харadžян. – *Кривий Ріг: Видавничий відділ НметАУ*. – 2010. – С. 119. 15. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence / F. Takens // *Dynamical Systems and Turbulence. Lecture Notes in Mathematics*, edited by D.A. Rand L.S. Young. – Heidelberg: Springer-Verlag. – 1981. – P. 366 – 381.

УДК 004.852; 004.94

П. О. Кравець

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра інформаційних систем та мереж

## ІГРОВА МОДЕЛЬ САМООРГАНІЗАЦІЇ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ

© Кравець П. О., 2015

Розроблено ігрову модель самоорганізації мультиагентних систем в умовах невизначеності. Наведено формулювання стохастичної ігрової задачі, визначено критерії самоорганізації стратегій гравців, розроблено рекуррентний метод, алгоритм та програмні засоби, що навчають мультиагентну систему імітувати синхронізоване ритмічне світіння колонії комах-світлячків.

**Ключові слова:** мультиагентні системи, умови невизначеності, стохастична ігрова модель, самоорганізація.

The game model of multi-agent systems of self-organizing in the conditions of uncertainty is developed. The formulation of a stochastic game problem is carried out, criteria of self-organizing of strategies of players are defined, a recurrent method, algorithm and software of learning of multi-agent system to simulate the synchronised rhythmic luminescence of a colony of fireflies are developed.

**Key words:** multi-agent systems, uncertainty conditions, stochastic game model, self-organizing.

### Мета роботи

Об'єктом дослідження цієї роботи є процеси самоорганізації мультиагентних систем в умовах невизначеності, спрямовані на досягнення скоординованої роботи складових елементів