

В. І. Синиця, М. В. Подрубайло

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ВИЯВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ В ЧАСОВИХ РЯДАХ МЕТОДОМ ПРОГРАМНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

Предметом вивчення в статті є процеси виявлення прихованих закономірностей поведінки складних систем для вирішення прикладних завдань аналізу і ідентифікації аномальних подій, що виникають в процесі функціонування досліджуваного об'єкту: вияв моменту та локалізація місця виникнення аномальної події, тривалість перебування в деякому числовому діапазоні, визначення причин її виникнення. **Метою** є дослідження можливості застосування методів нелінійної динаміки для виявлення і оцінки закономірностей поведінки складних систем, що генерують невизначені часові ряди. **Завдання:** розробити метод виявлення прихованих закономірностей поведінки складних систем, заснований на темпоральних паттернах поведінки, розробити інтелектуальний модуль системи діагностики у вигляді програмно-алгоритмічного забезпечення; розробити інженерну методику побудови математичної моделі сигналу, спрофільованого під задану маску фазового портрета; на прикладах дослідження експериментальних даних довести життєздатність запропонованого методу і дієздатність інженерної методики встановлення зв'язку між видом процесу в системі і фазової траєкторією. Використовуваним **методом** є комбінований підхід, який базується на методах нелінійної динаміки (фазовий аналіз), темпоральних паттернах поведінки, що відображають фрагменти відносин в даних, і методах класифікаційного аналізу. Отримані такі **результати**. Розроблено програмне забезпечення в інженерному середовищі графічного програмування LabVIEW фірми National Instruments, яке забезпечує максимальну візуалізацію процесу аналізу і моделювання часових рядів на основі побудови фазових портретів кореляційних функцій часових рядів. В результаті дослідження експериментальних даних на предмет динамічної поведінки за допомогою розробленого програмного модуля були отримані основні різновиди фазових портретів, які відповідають різним стадіям стану системи, що генерує невизначені часові ряди. Здійснено попередню групування, яке засноване на топологічній ідентичності фазових портретів на різних часових сегментах. Проведено аналіз і інтерпретація результатів групування, складена діаграма переходу з одного упорядкованого стану в інший. Побудована математична модель сигналу, спрофільованого під задану маску фазового портрета, за рахунок комбінування окремих компонент, «відповідальних» за окремі особливості фазового портрета, і визначені її параметри. На прикладах дослідження експериментальних даних доведено життєздатність запропонованого методу і дієздатність інженерної методики встановлення зв'язку між видом процесу в системі і фазової траєкторією. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: запропоновано метод виявлення прихованих закономірностей поведінки складних систем з використанням фазових портретів кореляційної функції, що базується на темпоральних паттернах поведінки, і методах класифікаційного аналізу; запропоновано інженерну методику побудови математичної моделі сигналу, спрофільованого під задану маску фазового портрета.

Ключові слова: приховані закономірності; фазовий аналіз; класифікаційний аналіз; виявлення неординарних подій; відновлення залежностей; невизначені часові ряди; аномальні події.

Вступ

В даний час системи інтелектуального аналізу і обробки вимірювальної інформації широко використовуються для визначення станів і аналізу функціонування складних технічних об'єктів, таких як: системи моніторингу і діагностики стану технологічного обладнання, системи геодинамічного моніторингу природно-техногенних явищ, автоматизованих систем керування технологічними процесами, і т. п. [1].

Аналіз проблеми. Задача вияву закономірностей зміни даних та їх взаємовпливу представляє суттєвий інтерес для інтелектуального аналізу та обробки вимірювальної інформації. Серед таких задач – аналіз аномальних подій, що виникають в процесі функціонування досліджуваного об'єкту: вияв моменту та локалізація місця виникнення аномальної події, тривалість перебування в деякому числовому діапазоні, визначення причин її виникнення та формування можливих варіантів її попередження. Однак для більшості складних динамічних об'єктів не представляється можливим виконати їх повний аналітичний опис і, відповідно, сформулювати адекватну модель, яка відобразатиме закономірності зв'язків об'єкта. Ситуація ускладнюється тим, що в переважній біль-

шості випадків відсутня можливість багаторазового повторення експерименту, а зміни станів об'єктів безпосередньо не спостерігаються. Подібна ситуація є типовою і актуальною для вимірювальних задач при експериментальних фізичних дослідженнях, проблема виявлення відноситься до категорії безмодельних досліджень, а алгоритми їх реалізації до проблеми «сліпої» цифрової обробки сигналів [2].

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження можливості застосування методів нелінійної динаміки для виявлення і оцінки закономірностей поведінки складних систем, що генерують невизначені часові ряди, а також розробка інтелектуального модуля системи діагностики у вигляді програмно-алгоритмічного забезпечення.

Методи вирішення. Завдання виявлення і оцінки закономірностей поведінки складних систем можна розглядати як задачу оцінки поточного стану об'єкта дослідження і завдання встановлення відмінностей між вхідними даними - завдання класифікації. Отже, для вирішення поставленої задачі пропонується використовувати комбінований підхід, який базується на методах нелінійної динаміки, темпоральних паттернах поведінки, що відображають фрагменти відносин в даних, і методах класифікаційного аналізу [3, 4].

Виклад основного матеріалу і результати досліджень

Для дослідження поведінки складних систем пропонується використовувати представлення процесів в фазовому просторі, яке є потужним засобом для вивчення випадкових процесів, і дозволяє представити поведінку складної системи в наочній геометричній формі.

Розроблено програмне забезпечення в інженерному середовищі графічного програмування LabVIEW фірми National Instruments, яке по суті визначає

вимірювальний прилад в системі віртуального інструментарію і забезпечує максимальну візуалізацію.

В результаті дослідження експериментальних даних на предмет динамічної поведінки за допомогою розробленого програмного модуля були отримані наступні основні різновиди фазових портретів, які відповідають різним стадіям стану системи, і представлені на рис. 1 [5].

Для окремих груп наведені ілюстрації декількох типів фазових портретів, які відповідають різним стадіям стану системи.

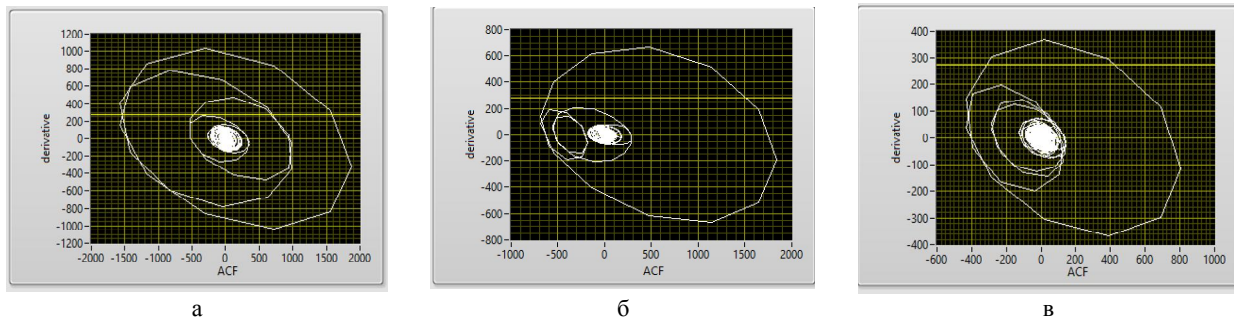


Рис. 1. Типові різновиди фазових портретів

Розглянемо особливості отриманих фазових портретів і дамо коротку характеристику представлених різновидів.

Для аттракторів всіх різновидів траєкторії процесу розвиваються таким чином: траєкторія виходить з початкової точки і закінчується замкнутою кривою - стійким граничним циклом, що відповідає рівноважному порядку в системі. Система, яка генерує досліджуваний часовий ряд, стійка.

Слід зазначити зовсім різні траєкторії і «граничні цикли» для різних видів наведених аттракторів.

Аттрактори по-різному заповнюють об'єм фазового простору: перший має максимальну площу, другий - середню, а третій - найменшу. Можна сказати, що велика площа є ознакою аттрактора зі слабким згасанням, маленька - сильне згасання. Іншими словами, поведінка об'єктів, яку можна описати часовими рядами, характеризується довжиною пам'яті, причому коротка пам'ять відповідає стаціонарним рядам, нескінченна - нестационарним рядам, а проміжні значення пам'яті можна віднести до таких типів поведінки часових рядів, коли спостерігається деяка післядія в системі під впливом внутрішнього фактора.

Аттрактори відрізняються площею обмеженої області «граничного циклу» (замкнута крива), яка часто називається «плямою» граничного циклу або зоною завихрень. Це говорить про те, що в системі спостерігається ефект «брякоту контактів» різної інтенсивності, що відповідає режиму періодичних автоколивань.

Також відмінність проявляється в місцезнаходженні «оборотів» фазової траєкторії по квадрантам фазового простору, їх кількості, розміру і відстані між ними. Така відмінність обумовлюється параметрами фактора котрий змінив стан системи, що ге-

нерує часовий ряд. Крім того, замкнуті криві можуть утворювати симетричний або асиметричний цикл аттрактора.

Крім наведених відмінностей, слід зазначити одну характерну особливість, якою відрізняється другий графік ФП від інших - біфуркацію втрати симетрії, яка відповідає перебудові характеру руху або структури системи. У наведеному випадку біфуркація відповідає появі додаткового обороту в лівій півплощині та відповідає поділу граничного циклу. Така конфігурація ФП визначається появою нового внутрішнього фактора (деформаційної події) впливає на поведінку системи і виходить як результат переходу системи з одного стану в інший.

Завдання знаходження неочевидних закономірностей можна сформулювати як задачу класифікаційного аналізу - виділення у приходящому потоці фазових портретів певного виду, який характеризує поточний стан об'єкта, і віднести його до певного класу подій. Прискорити процес класифікації та вибрати відповідний метод для подальшого аналізу дозволяє попередня групування - виявлення однорідних груп ФП.

Групування здійснювалося за запропонованою евристикой оцінки подібності об'єктів, яка заснована на топологічній ідентичності фазового портрета на різних часових сегментах. При цьому, два фазових портрета вважаються топологічно еквівалентними, якщо існує взаємно-однозначне безперервне відображення, що переводить один фазовий портрет в інший зі збереженням напрямку руху по траєкторіях. Вибір подібної евристики цілком природний при графічному представленні об'єктів, набагато простіший, ніж формувати простір ознак, і не вимагає додаткових обчислень. Евристика полягає в оцінці подібності у вигляді повноти заповнення

фазового простору, характеру фазових траєкторій, області розташування ФП і не суперечить фізично-умісту.

Порівняння проводити за принципом «накладення з вирівнюванням», який використовує перетворення зсуву і масштабу для приведення різних ФП у відповідність один з одним, що жодним чином не змінить відносних відстаней між об'єктами. Як орієнтири обрані великі структурні елементи (подібні ділянки типу дуг, контурів або завитків) - функціонально важливі і несучі найбільшу інформацію при розрізненні об'єктів.

Рішення поставленої задачі - знаходження мінімального набору фрагментів ФП, які подібні між

собою - проводилося на основі програмної інженерії в середовищі LabView з використанням максимальної візуалізації процесу обробки [6, 7].

Розглянемо роботу програми з розділення ФП на подібні групи після введення вагових коефіцієнтів (коефіцієнтів заповнення фазового простору).

Індикатором реакції системи на нову деформаційну подію може служити: перехід ФП в інший стійкий стан, порушення плавності кривої фазового портрета і зміна типу кривої, яка описує траєкторію руху.

Було виділено 3 типові групи ФП, що істотно відрізняються одна від одної, графіки якої подані на рис. 2.

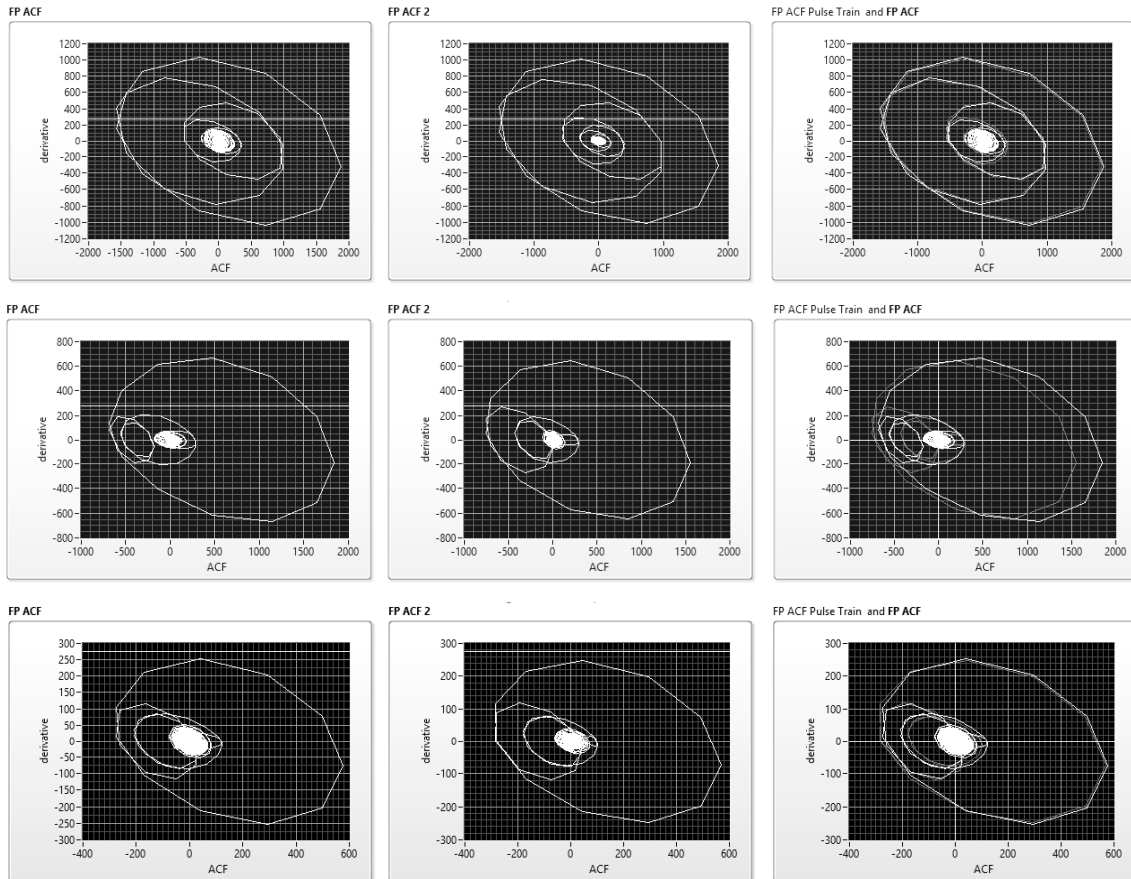


Рис. 2. Графіки представників груп ФП

Неважко помітити, що всередині кожної групи ФП відрізняються між собою більш дрібними деталями, наприклад площею «плями» аттрактору, що дозволяє припустити явні відмінності динаміки в «хвостовій» частині процесу (режим «брязкоту контактів»).

Після виділення основних груп було проведено аналіз і інтерпретація результатів групування, складена діаграма переходу з одного упорядкованого стану в інший, яка наведена на рис. 3.

Аналіз діаграми станів показав, що на діаграмі явно проглядаються кілька часових сегментів поведінкового стану системи.

Перший сегмент тривалістю 60 хвилин (19 часових сегментів) відповідає рівноважному порядку в системі і визначається поведінковим станом системи

з ФП першої групи. Далі цей рівноважний порядок в системі порушується під впливом деякого фактора, який істотно змінює динаміку системи. Система переходить в інший рівноважний стан, який визначається ФП другої групи (тобто знову зберігається рівноважний порядок, але при інших умовах).

У новому стані системи спостерігаються окремі сегменти, обумовлені короточасним впливом дестабілізуючих факторів, після закінчення яких система повертається в попередній рівноважний стан.

Таким чином, можна стверджувати, що за час спостереження сталася одна подія, яка істотно змінила стан системи на даному проміжку часу. Решту подій можна вважати другорядними і такими, що потребують подальшої класифікації та інтерпретації фахівцем в термінах конкретної предметної області.

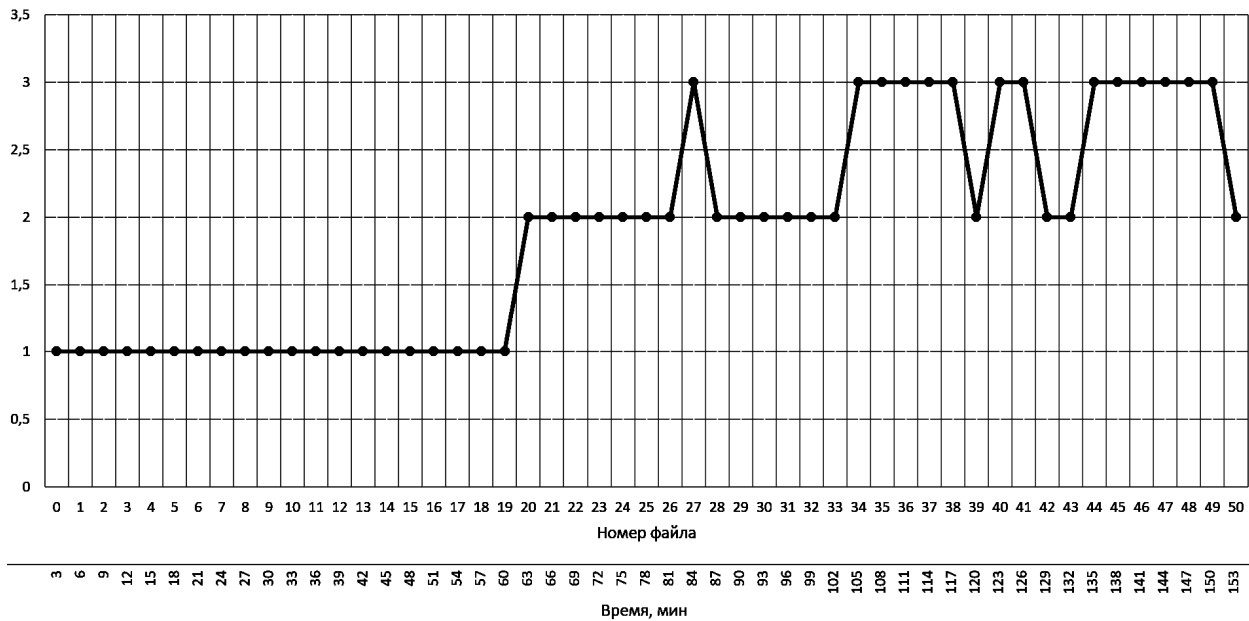


Рис. 3. Діаграма переходу з одного упорядкованого стану в інший

Більшість процесів або супроводжуються сигналами, або проявляють себе у вигляді сигналів, які відображають природу і перебіг цих процесів. Тому завжди виникає завдання побудови математичної моделі подій, які призвели до зміни стану або поведінки системи, а також визначення (оцінювання) її параметрів таким чином, щоб модель адекватно описувала реальний стан системи - задача ідентифікації. Для ідентифікації подій необхідно встановити зв'язок між видом процесу в системі і фазовою траєкторією шляхом конструювання моделі сигналу, що викликав зміну динаміки системи, по фазовому портрету [8].

Запропоновано інженерну методику побудови математичної моделі сигналу, спрофільованого під задану маску ФП, за рахунок комбінування окремих компонент, «відповідальних» за окремі особливості ФП, і визначення її параметрів, що відповідає процедурі структурно-параметричній ідентифікації.

Такий підхід дозволяє ідентифікувати характер події, що генерує експериментальні дані. Слід зазначити, що механізми породження початкових даних на даному етапі залишаються невідомими - побудувати модель джерела генеруючого спостережуваних даних без додаткової інформації не представляється можливим. На нашу думку, це можна зробити на основі наявних стереотипів поведінки об'єктів з аналогічними ФП.

Для реалізації даного підходу розроблено програмне забезпечення в середовищі LabView для генерації, як окремих компонентів, так і всього сигналу.

Для демонстрації можливостей процедури відновлення події в якості спостережуваного процесу використовувалися отримані реалізації.

Результати роботи програми з конструювання моделі сигналу (поетапно) для випадку відновлення ФП першої групи, представлені на рис. 4.

Графіки компонент сконструйованого сигналу наведені на рис. 5, а загальне модельне рівняння може бути подано у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 y_i = & A_1 e^{-\frac{5\pi^2 b^2 f_c^2}{q \cdot \ln(10)} (i\Delta t - d_1)^2} \cdot \cos\left(2\pi \cdot f_c (i\Delta t - d_1)\right) + \\
 & + A_2 e^{-\frac{5\pi^2 b^2 f_c^2}{q \cdot \ln(10)} (i\Delta t - d_2)^2} \cdot \cos\left(2\pi \cdot f_c (i\Delta t - d_2)\right) + \\
 & + A_3 \cdot \sin\left(2\pi k (i\Delta t - d_3) + \frac{\pi\varphi_0}{180}\right) + \\
 & + A_4 \cdot \sin\left(2\pi k (i\Delta t - d_4) + \frac{\pi\varphi_0}{180}\right) + \\
 & + A_5 \cdot \sin\left(2\pi k (i\Delta t - d_5) + \frac{\pi\varphi_0}{180}\right).
 \end{aligned}$$

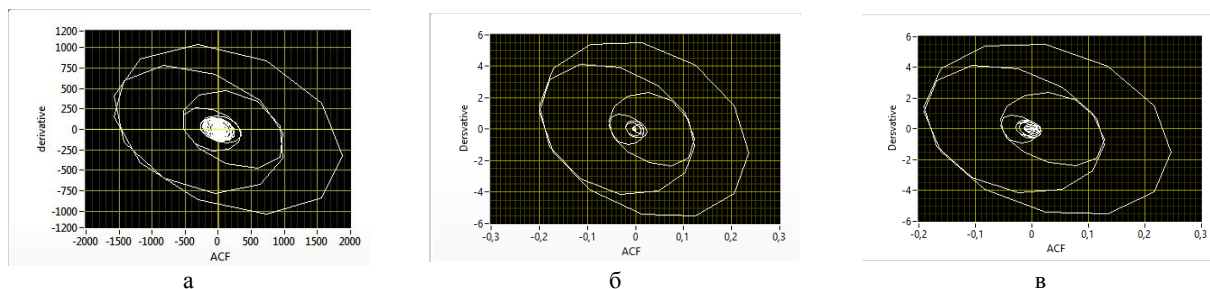


Рис. 4. а – експериментальний ФП; б – основа моделі; в – складена модель

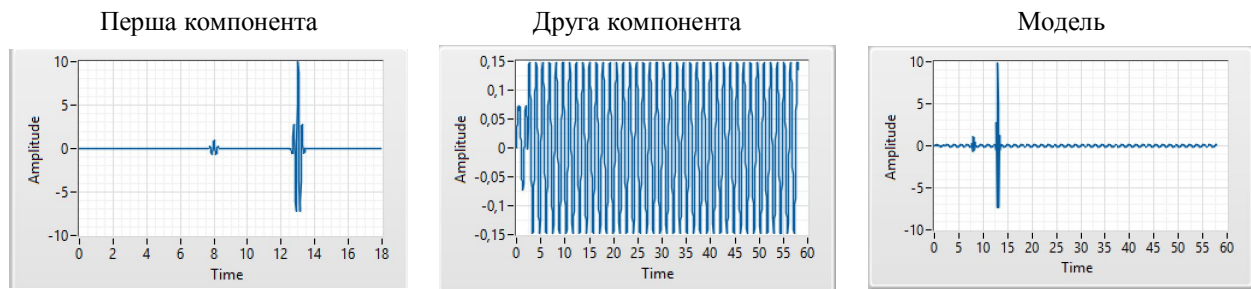


Рис. 5. Графіки застосованих компонент сигналу і модель сигналу

Сконструйована модель дозволяє виявити "основну", "стійку" частину математичної моделі, і потребує налаштування для забезпечення достатньої подібності з оригіналом, шляхом регулювання параметрів окремих компонент, наприклад:

$$y_i = A e^{-\frac{5\pi^2 b^2 f_c^2}{q \cdot \ln(10)} (i\Delta t - d)^2} \cdot \cos(2\pi \cdot f_c (i\Delta t - d)),$$

де A – амплітуда,
 b – нормалізована ширина смуги,
 q – затування,
 f_c – центральна частота (Гц),
 d – затримка,

або

$$y_i = A \cdot \sin\left(2\pi k (i\Delta t - d) + \frac{\pi\varphi_0}{180}\right),$$

де k – кількість циклів в шаблоні,

φ_0 – початкова фаза в градусах.

Висновки

На підставі отриманих результатів моделювання і попередніх досліджень сформульовані наступні положення:

- встановлено, що запропонований підхід до виявлення закономірностей дозволяє встановити причинно-наслідкову залежність між прихованим джерелом і зміною поведінки динамічної системи;
- запропонована інженерна методика конструювання моделі по масці фазового портрета адекватно відображає обраний прототип;
- розроблене програмне забезпечення забезпечує повну візуалізацію, як процесу виявлення неординарних подій, так і процесу конструювання моделі сигналу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бабак С. В. Статистическая диагностика электротехнического оборудования / С. В. Бабак, М. В. Мыслович, Р. М. Сысак. – Киев : Изд-во Института электродинамики НАН Украины, 2015. – 456 с.
2. Букреев В. Г. Выявление закономерностей во временных рядах в задачах распознавания состояний динамических объектов: монография / В. Г. Букреев, С. И. Колесникова, А. Е. Янковская. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 254 с.
3. Прикладная статистика: Классификации и снижение размерности : Справ. изд. / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. Под ред. С. А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
4. Молевич Н. Е. Нелинейная динамика / Н. Е. Молевич. – Самара : Изд - во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 160 с.
5. Синица В.І., Подрубайло М.В. Комп'ютерна програма «Автоматизована система побудови і аналізу корелограм часових рядів»; Свідоцтво: № 714075 від 20.01.17.
6. Синица В.І., Подрубайло М.В. Комп'ютерна програма «Автоматизована система побудови шаблонів фазових портретів»; Свідоцтво: № 73079 від 25.07.17.
7. Вапник В. Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным / В. Н. Вапник/ – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1979. – 448 с.

REFERENCES

1. Babak, S.V., Myslowich, M.V. and Sysak R.M. (2015), *Statistical diagnostics of electrical equipment*, Publishing house of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, 456 p.
2. Bukreev, V.G., Kolesnikova, S.I. and Yankovskaya, A.E. (2010), *Identification of regularities in time series in problems of recognition of states of dynamic objects*, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 254 p.
3. Aivazyan, S.A., Buchstaber, V.M., Enukov, I.S. and Meshalkin, L.D. (1989), *Applied Statistics: Classifications and Diminishing*, Finance and Statistics, Moscow, 607 p.
4. Molevich, N.E. (2007), *Nonlinear Dynamics*, Publishing House of the Samara State Aerospace University, Samara, 160 p.
5. Sinitsa, V.I. and Podrubaylo, M.V. (2017), computer program "Automated system of construction and analysis of correlogram of time series"; Certificate No. 714075 dated July 20, 2017.
6. Sinitsa, V.I. and Podrubaylo, M.V. (2017), computer program "Automated system for building templates of facial portraits"; Certificate No. 73079 dated July 25, 2017.
7. Vapnik, V.N. (1979), *Restoration of dependencies on empirical data*, Science, Moscow, 448 p.

Received (Надійшла) 28.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.05.2018

Выявление закономерностей во временных рядах методом программной инженерии

В. И. Сеница, М. В. Подрубайло

Предметом изучения в статье являются процессы выявления скрытых закономерностей поведения сложных систем для решения прикладных задач анализа и идентификации аномальных событий, возникающих в процессе функционирования исследуемого объекта: проявление момента и локализация места возникновения аномальной события, длительность пребывания в некотором числовом диапазоне, определения причин ее возникновения. **Целью** является исследование возможности применения методов нелинейной динамики для выявления и оценки закономерностей поведения сложных систем, генерирующих неопределенные временные ряды. **Задачи:** разработать метод выявления скрытых закономерностей поведения сложных систем, основанный на темпоральных паттернах поведения, разработать интеллектуальный модуль системы диагностики в виде программно-алгоритмического обеспечения; разработать инженерную методику построения математической модели сигнала, спрофилированного под заданную маску фазового портрета; на примерах исследования экспериментальных данных доказать жизнеспособность предложенного метода и дееспособность инженерной методики установления связи между видом процесса в системе и фазовой траектории. Используемым **методом** являются комбинированный подход, основанный на методах нелинейной динамики (фазовый анализ), темпоральных паттернах поведения, отражающие фрагменты отношений в данных, и методах классификационного анализа. Получены следующие **результаты**. Разработано программное обеспечение в инженерной среде графического программирования LabVIEW фирмы National Instruments, которое обеспечивает максимальную визуализацию процесса анализа и моделирования временных рядов на основе построения фазовых портретов корреляционных функций временных рядов. В результате исследования экспериментальных данных на предмет динамического поведения с помощью разработанного программного модуля были получены основные разновидности фазовых портретов, соответствующие различным стадиям состояния системы, генерирует неопределенные временные ряды. Осуществлена предварительная группировка, основанная на топологической идентичности фазовых портретов на различных временных сегментах. Проведен анализ и интерпретация результатов группировки, составлена диаграмма перехода с одной упорядоченного состояния в другое. Построена математическая модель сигнала, спрофилированного под заданную маску фазового портрета, за счет комбинирования отдельных компонент, «ответственных» за отдельные особенности фазового портрета, и определены ее параметры. На примерах исследования экспериментальных данных доказано жизнеспособность предложенного метода и дееспособность инженерной методики установления связи между видом процесса в системе и фазовой траектории. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: предложен метод выявления скрытых закономерностей поведения сложных систем с использованием фазовых портретов корреляционной функции, основанный на темпоральных паттернах поведения, и методах классификационного анализа; предложено инженерную методику построения математической модели сигнала, спрофилированного под заданную маску фазового портрета.

Ключевые слова: скрытые закономерности; фазовый анализ; классификационный анализ; выявление неординарных событий; восстановления зависимостей; неопределенные временные ряды; аномальные события.

Identification of regularities in time series by the method of software engineering

V. Sinita, M. Podrubailo

The **subject** of the study in the article are the processes of revealing hidden models of behavior of complex systems for solving applied problems of analysis and identification of anomalous events occurring in the process of functioning of the investigated object: the manifestation of the moment and localization the occurrence of an anomalous event, the length of stay in a certain numerical range and the causes of its occurrence. **The purpose** is to investigate the possibility of using nonlinear dynamics methods to identify and evaluate patterns of behavior of complex systems that generate indefinite time series. The **tasks** to be solved are: to develop a method for identifying hidden patterns of behavior of complex systems, based on temporal patterns of behavior, to develop an intelligent module of the diagnostic system in the form of software and algorithmic support; to develop an engineering technique for constructing a mathematical model of a signal, profiled for a given mask of a phase portrait; on the examples of the research of experimental data, to prove the viability of the proposed method and the ability of the engineering technique to establish the relationship between the type of process in the system and the phase trajectory. The **method** used is a combined approach based on methods of nonlinear dynamics (phase analysis), time patterns of behavior reflecting fragments of relationships in data and methods of classification analysis. The following **results** are obtained. Software is developed in the LabVIEW graphical programming environment of National Instruments, which provides maximum visualization of the process of analyzing and modeling time series based on the construction of phase portraits of correlation functions of time series. As a result of researching experimental data on dynamic behavior with the help of the developed software module, the main types of phase portraits corresponding to different stages of the system state were generated, generating non-definite time series. A preliminary grouping of phase portraits based on the topological identity of phase portraits at various time segments was carried out. The analysis and interpretation of grouping results are carried out, the diagram of transition from one ordered state to another is made. A mathematical model of a signal configured for a given mask of a phase portrait is constructed, by combining individual components "responsible" for individual features of the phase portrait, and its parameters are determined. On the examples of the research of experimental data, the viability of the proposed method and the ability of the engineering technique to establish the connection between the type of process in the system and the phase trajectory are proved. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained is as follows: a method is proposed for revealing the hidden regularities in the behavior of complex systems using phase portraits of the correlation function, based on temporal patterns of behavior, and methods of classification analysis; an engineering technique for constructing a mathematical model of a signal, configured for a given mask of the phase portrait, was proposed.

Keywords: hidden regularities; phase analysis; classification analysis; revealing of extraordinary events; restoration of dependencies; indefinite time series; anomalous events.