

О. В. Дергунов¹, к.т.н., Г. В. Мартинюк², аспірантка

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ МОМЕНТІВ РОЗЛАДІВ КУСКОВО-СТАЦІОНАРНИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ



Scientific and technical problems of noise diagnostic are important for monitoring object's conditions in wide variety of applied fields. They are particularly relevant nowadays in circumstances when machinery has fulfilled its technical resource.

The detection of defects and malfunctions and determination of their progress stage are only possible by detailed analysis of diagnostic signal's structure. Such analysis is possible in the presence of the adequate mathematical models of signals. Most methods of signal statistical analysis are based on models that are stationary random process. If real-world diagnostic signals are represented as time-series and their stationarity is checked, the results mostly indicate that data is non-stationary. Therefore, most of the diagnostic signals cannot be described as stationary processes. That is why it is important to develop prior-analysis techniques for detecting stationary intervals in signals to present them in the form of piecewise stationary time-series.

There are various methods and techniques for different types of change-points detection. Most of them are suitable for the particular type of non-stationarity and need certain amount of prior-information about the process. Also they show low efficiency in case of complex multi-type non-stationarity.

Article presents new method of time-series analysis for change-point detection. Method can be used to detect change-points in time-series with different types of non-stationarity. Method's operability and reliability were verified by computer simulation experiment. The results are presented.

The method is based on the statistical analysis procedure with sliding window technique and consists of two stages. On the first stage time-series is processed by sliding window. Sliding statistical characteristics of mean and standard deviation are measured on the window interval. Non-stationarity and its type are detected by the form of distribution of these characteristics. On the second stage change-points are measured with the help of sliding statistical analysis of the characteristics defined on the first stage. Computer simulation experiments were made to verify the validity of the method. In these experiments the method was used to detect non-stationarity and its type and determine change-points in simulated time-series with known change-points intervals.

The results of the experiments show that designed method can be used for prior-analysis of piecewise non-stationary time-series for values of non-stationarity intensity higher than 0,7. For such cases the probability of correct change-point detection is higher than 99,5%.

¹ Національний авіаційний університет, кафедри інформаційно-вимірювальних систем навчально-наукового інституту інформаційно-діагностичних систем

² Національний авіаційний університет, кафедри інформаційно-вимірювальних систем навчально-наукового інституту інформаційно-діагностичних систем

Ru

Уделено внимание нахождению моментов разладки временных рядов. Представлены математические модели временных рядов, а также различных видов разладки. Описан алгоритм метода обнаружения, идентификации и локализации моментов разладок временных рядов. Приведены результаты экспериментального исследования зависимости достоверности выявления факта разладки от её интенсивности.

Вступ

Сучасні науково-технічні проблеми шумової діагностики стають все більш важливими, головним чином тому, що значна частина технічних об'єктів і систем в таких галузях, як машинобудування, енергетика та транспорт відпрацювала свій технічний ресурс і подальше їх використання можливе у разі постійного моніторингу їх стану. Виявлення несправностей, які ще не привели до катастрофічних наслідків, визначення ступеня розвитку дефекту і його ознак можливі лише на основі детального дослідження структури сигналів. Опис такої структури можливий на основі адекватних математичних моделей сигналів, які відображають ті їх риси, що є необхідними для встановлення стану механічної системи.

Більшість методів статистичного аналізу сигналів, вимірних у різних точках об'єктів дослідження чи у різних напрямках, ґрунтуються на їх моделях у вигляді стаціонарних випадкових процесів [2]. Однак, розглядаючи такі сигнали як часові ряди (ЧР) і застосовуючи до них критерії перевірки на стаціонарність, можна зробити висновок [3-4], що більшість із них є нестаціонарними.

Отже, на практиці інформаційні сигнали із фізичної точки зору, зазвичай, не можна безпосередньо описати стаціонарними моделями. Тому, необхідно вирішувати задачу пошуку таких шляхів попередньої обробки інформаційних сигналів, які б дозволяли виділяти інтервали, на яких сигнали можна розглядати як умовно стаціонарні. Для аналізу таких сигналів пропонується дослідити виявлення часових моментів миттєвих розладів сигналів, за умови, що нестаціонарний сигнал можна розглядати як кусково-стаціонарний на різних інтервалах стаціонарності.

Для знаходження різних видів розладу використовується велика кількість алгоритмів та критеріїв [5-6], таких, наприклад, як алгоритми кумулятивних сум, Сегена-Сандерсона, Надлера-Роббінза, ряд алгоритмів із пам'яттю тощо. Але недоліком більшості цих алгоритмів є те, що вони вузьконаправлені та потребують певної кількості апріорної інформації, що не завжди відома під час обробки часових рядів (ЧР). Також, слід зауважити, що зазначені алгоритми мають низьку ефективність у разі складних випадках наявності різних типів розладу у досліджуваному ЧР.

Постановка задачі

Запропонувати метод виявлення миттєвих моментів розладу часових рядів. Обґрунтувати застосування даного методу для пошуку різних типів розладу, у тому числі комбінованих. Провести комп'ютерний модельний експеримент із використання методу під час дослідження багатокомпонентного циклічного сигналу. Зробити висновок про доцільність використання методу за умови різних значень інтенсивності розладу.

Під досліджуванним числовим рядом прийнято вважати реалізацію багатокомпонентного циклічного сигналу:

$$s[j] = \sum_{i=1}^m (s_i[j]) + n[j], \quad (1)$$

$$s_i[j] = S_i[j] \cos(\Phi_i[j]), \quad (2)$$

де $s_i[j]$ – i -та циклічна компонента, $n[j]$ – реалізація гауссового стаціонарного шуму, для якого $M_n = 0$, $D_n = \sigma^2$, $S_i[j]$ – амплітудна характеристика i -ї циклічної компоненти, $\Phi_i[j]$ – фазова характеристика i -ї циклічної компоненти, $j=1 \dots J$, J – обсяг реалізації. Виконується властивість – $s_i[j] \in L_2$ і для $s_i[j]$ існує перетворення Гільберта, максимальне значення не перевищує $0,5 \sigma$.

Розлад моделюється шляхом модифікації реалізації $s[j]$. Математичні моделі розладу у залежності від її класифікації можна представити наступним чином:

$$1. \text{ «Зсув середнього» } - s_r[j] = \begin{cases} s[j], & j \notin k, k = k_{\min} \dots k_{\max}, \\ s[j] + M_s, & j \in k, k = k_{\min} \dots k_{\max}. \end{cases}$$

$$2. \text{ «Зсув дисперсії» } - s_r[j] = \begin{cases} s[j], & j \notin k, k = k_{\min} \dots k_{\max}, \\ s[j] \sigma_s, & j \in k, k = k_{\min} \dots k_{\max}. \end{cases}$$

$$3. \text{ «Тренд» } - s_r[j] = s[j] + s_t[j], \text{ де } s_t[j] \text{ – монотонно зростаюча функція.}$$

Межі інтервалу розладу (k_{\min} та k_{\max}) відомі та задаються при моделюванні. Величини M_s та σ_s визначаються інтенсивністю розладу K_R :

$$K_R = \frac{M_s}{\sigma} \text{ – для розладу типу «зсув середнього»};$$

$$K_R = \frac{\sigma_s}{\sigma} - 1 \text{ – для розладу типу «зсув дисперсії»}.$$

Розв'язок задачі

Значна кількість часових рядів представляє собою нестационарні багатокомпонентні дані. За наявності у досліджуваних ЧР монотонного тренду, його виділення є першочерговою задачею та відноситься до процедур

попередньої обробки часового ряду. Відомим методом попереднього опрацювання ЧР, який передбачає виділення тренду та циклічних компонент є метод сингулярного спектрального аналізу (Гусениця – SSA) [8]. Алгоритм методу складається із двох етапів: декомпозиції та відновлення. На етапі декомпозиції відбувається перетворення часового ряду на траєкторну матрицю та розкладання її на елементарні матриці. На етапі відновлення отримані елементарні матриці групують для розділення адитивних компонент часового ряду. Потім до згрупованих елементарних матриць застосовують операцію діагонального усереднення і отримують виділені адитивні компоненти.

Для виявлення факту наявності розладу, а також для визначення миттєвих моментів розладу можна застосувати аналіз із використанням ковзної віконної статистичної обробки. Для цього вздовж досліджуваного ЧР переміщують ковзне вікно, на інтервалі якого визначають ковзні статистичні характеристики математичного сподівання та середньоквадратичного відхилення. Із огляду на це було сформульовано наступний метод виявлення, ідентифікації та визначення інтервалів розладки часових рядів.

1. До досліджуваного ЧР $s_r[j]$ застосовують метод SSA з параметром довжини вікна розкладу рівним $1/2$ або $1/3$ довжини ЧР та виділяють першу компоненту – тренд ЧР $\hat{s}_t[j]$ (рис. 1, а):

$$\text{SSA}[s_r[j]] \rightarrow \hat{s}_t[j]. \quad (3)$$

2. Подальшу обробку виконують для різниці досліджуваного ЧР та виділеного тренду (рис. 1, б):

$$\hat{s}_r[j] = s_r[j] - \hat{s}_t[j]. \quad (4)$$

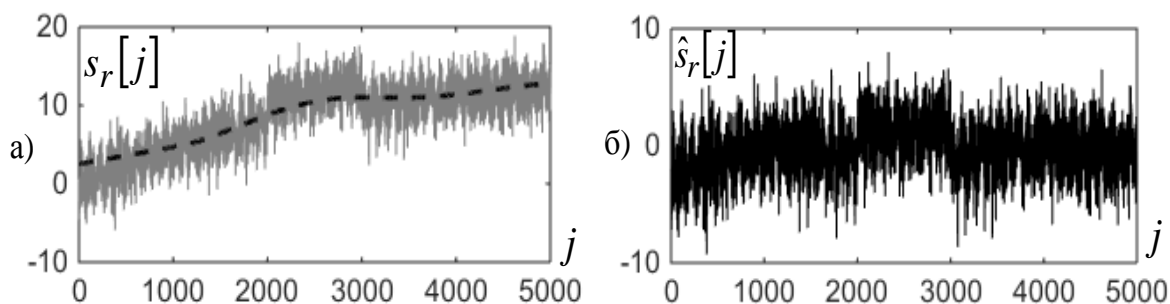


Рис. 1. Графіки: а) досліджуваного ЧР $s_r[j]$ та виділеного тренду $\hat{s}_t[j]$, б) їх різниці $\hat{s}_r[j]$

3. Сканують ЧР $\hat{s}_r[j]$ ковзним вікном довжиною $W_{S1}=0,02J$ та визначають ковзні характеристики вибірових математичного сподівання $\hat{M}[j]$ та середньоквадратичного відхилення $\hat{\sigma}[j]$.

4. Перевіряють характер закону розподілу отриманих характеристик $\hat{M}[j]$ та $\hat{\sigma}[j]$. У випадку наявності розладу типу «зсуву дисперсії» або «зсуву середнього», відповідні характеристики мають багатомодальні закони

розподілу (рис 2, рис 3). У дослідженні для перевірки на унімодальність авторами використаний критерій Хартігана [9].

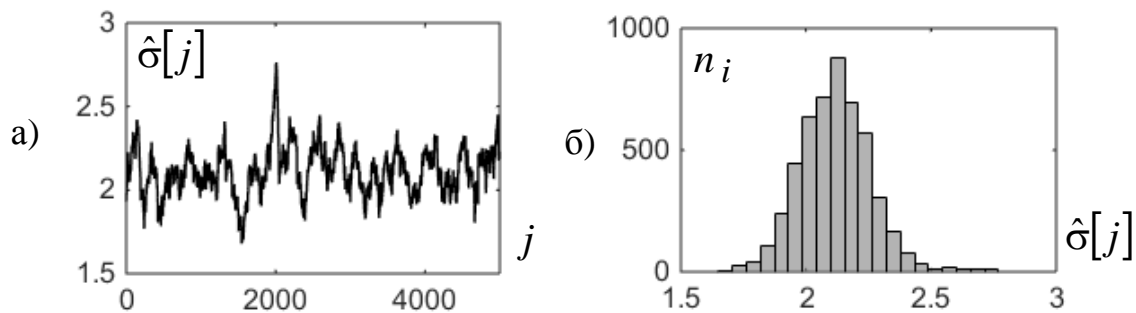


Рис. 2. Графіки ковзної характеристики вибіркового середньоквадратичного відхилення $\hat{\sigma}[j]$ (а) та її полігон частот (б) у разі наявності розладу типу «зсув середнього»

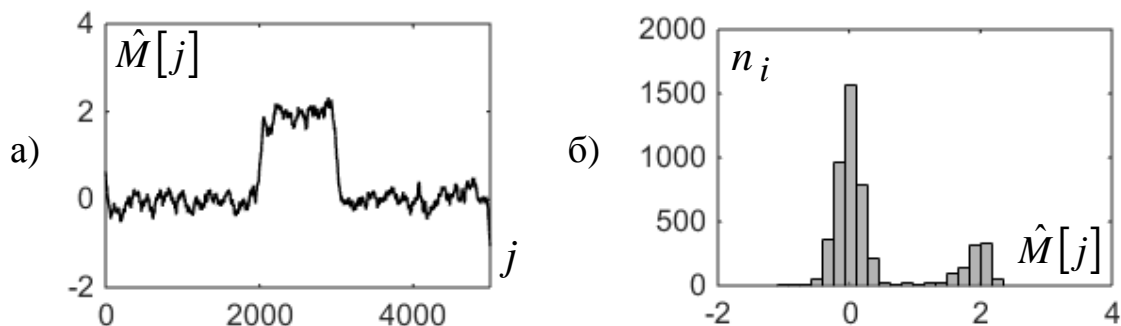


Рис. 3. Графіки ковзної характеристики вибіркового математичного сподівання $\hat{M}[j]$ (а), та її полігон частот (б) при наявності розладу типу «зсув середнього»

5. Після виявлення факту розладу та ідентифікації її типу використовують ковзний аналіз відповідної характеристики ($\hat{M}[j]$ або $\hat{\sigma}[j]$ згідно із рис. 2 – рис. 3) для визначення миттєвих моментів розладу. Сканують відповідну характеристику ковзним вікном довжиною $W_{S2}=0,05J$ та визначають ковзну характеристику середньоквадратичного відхилення $\hat{\sigma}_s[j]$. Ділянки характеристики $\hat{\sigma}_s[j]$, що перевищують граничне значення $L = \overline{\hat{\sigma}_s[j]} + 1,1\sigma[\hat{\sigma}_s[j]]$ вважають такими, що вказують на моменти розладу (рис. 4).

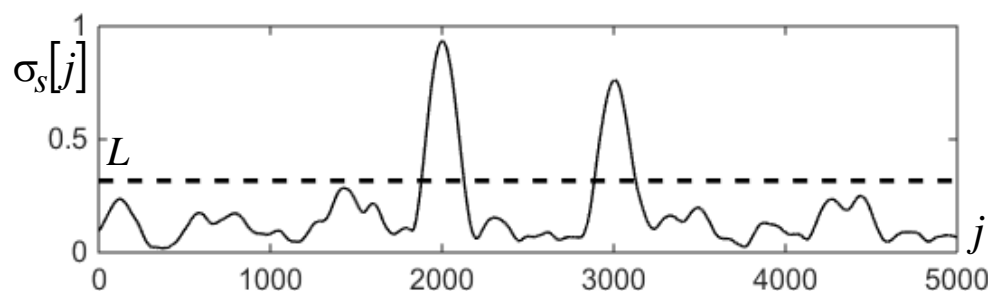


Рис. 4. Ілюстрація ознаки виявлення моментів розладу

Для перевірки достовірності запропонованого методу було проведено комп'ютерне випробування, під час якого застосовували представлений метод до модельованих ЧР із відповідними типами розладу. Алгоритм проведення випробування запропонованої методу пошуку миттєвих моментів розладу передбачає його застосування до часового ряду $s_r[j]$, визначення факту наявності розладу, а також значень k_{min} та k_{max} в якості початку та кінця інтервалу розладу. У зв'язку із цим можна отримати 3 варіанти прийнятого рішення про достовірність:

- правильне виявлення факту розладки;
- помилка першого роду (відсутність розладки при її присутності);
- помилка другого роду (присутність розладки при її відсутності).

Як модель часового ряду використано дискретну реалізацію багатокомпонентного циклічного сигналу (1, 2). Розлад моделюється шляхом модифікації реалізації $s[j]$. Дослідження проводилося для розладу типу «зсув середнього». Миттєві моменти розладу (k_{min} та k_{max}) відомі та задаються під час моделювання. Величина M_S визначаються інтенсивністю розладу K_R . У ході експериментів визначалася залежність похибки визначення координат моментів розладу від значення інтенсивності розладу K_R .

Початковими значеннями параметрів моделювання прийняті:

- інтенсивність розладу $K_R \in [0; 2]$;
- кількість циклічних компонент $i = 1$;
- амплітудна характеристика циклічної компоненти стала: $S_i[j] = 1$;
- фазова характеристика циклічної компоненти $\Phi_i[j] = jT_D$;
- період дискретизації $T_D = 1 \times 10^{-5}$ с;
- обсяг реалізації $J = 5000$;
- середньоквадратичне відхилення реалізації гауссового стаціонарного шуму $\sigma = 2$;
- моменти розладу: $k_{min} = 2000$, $k_{max} = 3000$;
- кількість повторень експерименту на кожному значенні інтенсивності розладки $L = 10000$.

У табл. 1 представлено усереднені результати експериментів.

Таблиця 1.

Результати дослідження достовірності представленого метода

Інтенсивність розладки K_R	Середня кількість виявлених точок розладки	Середня кількість правильно визначених точок	Середня кількість помилок першого роду	Відсоток помилок першого роду, %	Середня кількість помилок другого роду
<0,1	0	0	2	100	0
0,2	0,79	0	2	100	0,79

Інтенсивність розладки K_R	Середня кількість виявлених точок розладки	Середня кількість правильно визначених точок	Середня кількість помилок першого роду	Відсоток помилок першого роду, %	Середня кількість помилок другого роду
0,3	2,86	0,33	1,62	81	2,53
0,4	3,75	1,26	0,73	36,5	2,49
0,5	3,61	1,82	0,18	9	1,79
0,6	2,89	1,94	0,06	3	0,95
0,7	2,5	1,99	0,01	0,5	0,51
0,8	2,26	1,99	0,01	0,5	0,27
0,9	2,15	1,99	0,01	0,5	0,16
1	2,07	2	0	0	0,07
1,1	2,02	2	0	0	0,02
>1,2	2	2	0	0	0

Із огляду на отримані результати експерименту, можна стверджувати що запропонований метод дозволяє успішно виявляти факт наявності розладу, ідентифікувати її тип та визначати миттєві моменти розладу для інтенсивності розладу $>0,7$ із імовірністю помилки першого роду $<0,5\%$ та імовірністю помилки другого роду $<25\%$. У разі інтенсивності розладу >1 , імовірності помилок першого та другого роду не перевищують 0% та 3% відповідно.

Висновки

У статті проведено аналіз задачі виявлення моментів розладу часових рядів, що є актуальним завданням під час дослідження багатьох фізичних процесів. Запропоновано метод виявлення, ідентифікації типу розладу та визначення моментів, якій полягає у застосування процедур ітераційного ковзного сканування досліджуваного часового ряду, визначення вибіркового статистичних характеристик та за їх аналізом прийняття відповідних рішень про наявність, тип та моменти розладу. Результати проведених комп'ютерних модельних експериментів підтверджують працездатність метода та дозволяють оцінити його достовірність. Метод можна вважати перспективним для подальших досліджень.

Список використаної літератури

1. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол А – М.: Мир, 1989. – 540 с.
2. Букреев В. Г. Выявление закономерностей во временных рядах в задачах распознавания состояний динамических объектов / В. Г. Букреев,

- С. И. Колесникова, А. Е. Янковская. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 254 с.
3. *Коваленко Д. С.* Исследование применимости алгебраического подхода к анализу временных рядов / Д. С. Коваленко, В. А. Костенко, Е. А. Васин // *Методы и средства обработки информации.* – М.: Изд-во ВМиК МГУ, 2005. – С. 553–559.
 4. *Никифоров И. В.* Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов / И. В. Никифоров. – М.: Наука, 1983. – 200 с.
 5. *Бродский Б. Е.* Асимптотически оптимальные методы в задаче скорейшего обнаружения разладки. Характеристики методов скорейшего обнаружения разладки / Б. Е. Бродский // *Автоматика и телемеханика.* – 1995. – №9. – С. 60–72.
 6. *Бродский Б. Е.* Сравнительный анализ некоторых непараметрических методов скорейшего обнаружения момента разладки случайной последовательности / Б. Е. Бродский, Б. С. Дарховский // *Теория вероятностей и ее применения.* – 1990. – т.35, №4. – С. 655-668.
 7. *Elsner J. В.* Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis // J. В. Elsner, А. Tsonis.— New York, London: Plenum Press, 1996.— 164 p.
 8. *Данилова Д. Л.* Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Д. Л. Данилова, А. А. Жиглявский. – Санкт-Петербург, 1997. – 325 с.
 9. *Hartigan J.* The Dip Test of Unimodality / J. А. Hartigan, Р. М. Hartigan // *The Annals of Statistics*, Vol. 13, No. 1. (Mar., 1985), pp. 70–84.