

УДК 004.67

Я.В. ЛИТВИНЕНКО, Н.В. ЗАГОРОДНА, І.Б. ОКІПНИЙ, Г.М. ОСУХІВСЬКА
Тернопільський національний технічний університету імені Івана Пулюя**МЕТОД ВЕРИФІКАЦІЇ ЦИКЛІЧНОСТІ (ОЦІНЮВАННЯ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО СИГНАЛУ НА ПРИНАЛЕЖНІСТЬ ДО ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ)**

В роботі розглядається задача оцінювання досліджуваного сигналу на приналежність до циклічних сигналів. Для таких сигналів характерно наявність чіткої повторюваної сегментної структури, яка складається із сегментів-циклів та сегментів-зон на циклах. При цьому циклічні сигнали характеризуються окрім сегментної структури, ще і ритмічною структурою, яка відображає постійний або змінний ритм. Для розв'язку задачі верифікації на циклічність (підтвердження припущення (вірогідного факту) про приналежність досліджуваного сигналу до циклічних) приймається гіпотеза, про те що аналізований сигнал може бути описаний математичною моделлю у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною структурою (стохастичний випадок), або циклічною числовою функцією із сегментною структурою (детермінований випадок). При такому підході перевіряється два фрагмента досліджуваного сигналу характеристики яких порівнюються між собою. Для підтвердження припущення про те що досліджуваний сигнал є циклічним характеристики одної частини сигналу мають бути подібні, рівні (детермінований випадок) або стохастично еквівалентні (стохастичний випадок). Розроблений метод верифікації циклічності дозволяє оцінити чи досліджуваний сигнал має повторювану структуру і чи ця структура, а точніше її характеристики є подібними. Під час встановлення факту приналежності досліджуваного сигналу до циклічних сигналів дозволить коректно застосовувати до його опрацювання весь розроблений апарат методів: статистичної обробки, методів оцінювання ритмічної структури та методів моделювання циклічних сигналів. Розроблений метод може бути використаний при проведенні досліджень циклічних сигналів в медицині, економіці, механіці та інших галузях науки та техніки. Даний метод можна модифікувати шляхом зміни блоку математичного забезпечення, який враховує факт Гаусовості розподілу значень досліджуваного сигналу на врахування інших особливостей характеристик сигналів які будуть досліджуватись.

Ключові слова: циклічний сигнал, верифікація, сегментна структура, ритмічна структура.

I.V. LITYVNYENKO, N.V. ZAGORODNA, I.B. OKIPNYI, G.M. OSUKHIVSKA
Ternopil Ivan Puluj National Technical University**METHOD OF VERIFICATION OF CYCLICITY (EVALUATION OF THE RESEARCHED SIGNAL ON BEING RELATED TO CYCLE SIGNALS)**

In this study, the task of evaluating the researched signal on being related to cyclic signals is considered. Such signals are characterized by the presence of a clear repetitive segment structure which consists of segments-cycles and segments-zones in cycles. Besides the segment structure, the cyclic signals are also characterized by the rhythm structure which shows constant or variable rhythm. In order to solve the task for verifying the cyclicity (confirmation of the assumption (possible fact) that the investigated signal is related to cyclic signals) we need to accept the hypothesis that the signal we consider can be described with a mathematical model in a form of a cyclic random process with a segment structure (stochastic case), or through a cyclic numeric function with a segment structure (deterministic case). With this approach, two fragments of the investigated signal are being checked, the characteristics of which are compared to each other. In order to confirm the assumption that the considered signal is, in fact, a cyclic signal, the characteristics of one of the parts of the signal need to be similar, equal (deterministic case) or stochastically equivalent (stochastic case). The developed method of verification of cyclicity allows evaluating if the considered signal has a repetitive structure and if this structure, or more precisely, its characteristics, are similar. After confirming that the considered signal is actually related to cyclic signals it will be possible to use more accurately the developed apparatus of methods for further analysis of the signal: statistical processing, methods for evaluating the rhythm structure and cyclic signal simulation methods. The developed method can be used for conducting research relating to cyclic signals in medicine, economics, mechanics and other fields of science and technology. The method can be modified through changes in the part relating to the mathematical computations, which takes into account Gauss's fact of the distribution of values of the studied signal considering other peculiarities of characteristics of signals that are going to be studied further.

Keywords: cyclic signal, verification, segment structure, rhythm structure.

Вступ. У різних галузях науки та техніки існують коливні, циклічні явища та сигнали. Такі циклічні сигнали, розгортаючись у часі мають явно виражені, на реалізаціях, етапи, цикли, фази, які повторюються. Відомим прикладом циклічних сигналів є електрокардіосигнал, який відображає електричну активність скорочення відділів серця, також до циклічних відносять: циклічні економічні процеси, процеси рельєфних утворень на поверхні металів які формуються під дією різних впливів на них [1, 2, 11]. У таких циклічних сигналах тривалості циклів можуть бути рівними між собою, тоді говорять про стабільний ритм, або значно відрізняються один від одного – говорять про змінний ритм циклічного сигналу. Як частинний випадок сюди можна віднести періодичні (циклічні) сигнали, у яких ритм стабільний. Іноді досліджуваний сигнал який розгортається у часі візуально має коливний, повторюваний характер в такому випадку постає питання чи можливо його аналізувати та опрацьовувати, застосовувавши весь потужний апарат методів обробки циклічних сигналів. З метою перевірки гіпотези про приналежність досліджуваних даних до циклічних сигналів, тобто їх верифікації і був розроблений даний метод.

Дана стаття присвячена методу верифікації циклічності досліджуваного сигналу (оцінювання сигналу на приналежність до циклічних сигналів).

Постановка задачі дослідження. В роботах [3, 4] описано математичну модель коливних явищ та сигналів у вигляді циклічної функції, зокрема введено поняття неперервного та дискретного циклічних

випадкових процесів із сегментною структурою, що узагальнює поняття періодичної та майже періодичної функцій для детермінованих та стохастичних випадків. В роботі [4] було показано, що ритмічна структура циклічної функції описується дискретною функцією ритму, яка визначає закон зміни часових інтервалів між однофазними значеннями циклічної функції. В автоматизованих системах цифрової обробки циклічних даних, зокрема кардіодіагностичних, використовуються методи сегментації [1, 5], дискретизації [6], оцінювання ритмічної структури [7, 8, 9], статистичної обробки [10] та імітаційного моделювання [11]. Адекватне, коректне застосування цих методів до досліджуваних сигналів можливо у тому випадку, коли встановлено факт їх приналежності до циклічних сигналів, що робить дану задачу побудови методу верифікації циклічності важливою та актуальною.

Основна частина. З метою побудови інструменту верифікації циклічності був розроблений метод верифікації циклічності який за допомогою участі експерта (метод є напівавтоматизований), можна використовувати для встановлення приналежності досліджуваного сигналу до класу циклічних сигналів. Перед початком розгляду даного методу попередньо необхідно сказати, що він заснований на порівнянні характеристик двох частин досліджуваного сигналу при умові існування відомостей про факт нормального (Гаусового) розподілу значень досліджуваного сигналу. Якщо такий факт не встановлено то необхідно в методі врахувати інші характеристики за якими буде здійснено порівняння. Експерименти проводились для кардіосигналів [12], економічних сигналів [13] для яких встановлено факт нормального розподілу значень досліджуваного сигналу.

Для розв'язку задачі верифікації циклічності (підтвердження припущення (вірогідного факту) про приналежність досліджуваного сигналу до циклічних) постулюється, що аналізований сигнал може бути описаний математичною моделлю у вигляді циклічного випадкового процесу із сегментною структурою (стохастичний випадок), або циклічною числовою функцією із сегментною структурою (детермінований випадок).

Даний метод може бути застосований до експериментальних даних при умові достатньої кількості зареєстрованих циклів. Розглянемо суть даного методу для стохастичного випадку, оскільки детермінований входить в стохастичний як частинний випадок.

Опис методу верифікації циклічності

Вхідними даними для даного методу є реалізація досліджуваного сигналу $\xi_{\omega}(t), t \in \mathbf{W}$.

1. Першим кроком методу є розділення досліджуваної реалізації на дві окремих частини (проводить експерт), при цьому не потрібно синхронізувати початки відліків циклів двох частин досліджуваних реалізацій, це буде здійснено на етапі сегментації, синхронізувавши однофазні відліки початків циклів.

При даному підході будемо аналізувати дві окремі частини сигналу, тобто:

$$\xi_{\omega}(t) = \sum_{q=1}^2 \xi_{q\omega}(t), \quad \xi_{1\omega}(t), t \in \dot{\mathbf{W}}, \quad \xi_{2\omega}(t), t \in \ddot{\mathbf{W}}, \quad \mathbf{W} = \dot{\mathbf{W}} \cup \ddot{\mathbf{W}}. \quad (1)$$

2. Далі проводиться паралельна обробка окремо двох частин сигналу, починаючи із застосування методів сегментації [2, 5], при цьому отримують множини відліків часу для ідентифікованої сегментної циклічної структури $\hat{\mathbf{D}}_c = \{\hat{t}_i, i = \overline{1, \hat{C}}\}$ або ідентифікованої сегментної зонної структури

$$\hat{\mathbf{D}}_z = \left\{ \hat{t}_i, i = \overline{1, \hat{C}}, j = \overline{1, \hat{Z}} \right\},$$

першої частини і аналогічно сегментної структури $\ddot{\mathbf{D}}_c = \{\ddot{t}_i, i = \overline{1, \ddot{C}}\}$ та

$$\ddot{\mathbf{D}}_z = \left\{ \ddot{t}_i, i = \overline{1, \ddot{C}}, j = \overline{1, \ddot{Z}} \right\}$$

для другої частини досліджуваного сигналу. Де \hat{C}, \ddot{C} - кількість сегментів-

циклів для відповідних частин сигналу, \hat{Z}, \ddot{Z} - кількість сегментів-зон на відповідних сегментах-циклах частин сигналу, кількість сегментів-зон на циклі має бути однаковою.

3. Наступним етапом є оцінювання ритмічної структури окремо кожної частини досліджуваного сигналу, для цього використовуються методи описані в роботах [7-9]. На цьому етапі у випадку проведеного аналізу ритму коли встановлено що він є стабільним, отримують оцінки значень періоду \hat{T}_{ξ_1} , \ddot{T}_{ξ_2} або у випадку коли ритм - змінний отримують функції ритму $\hat{T}_{\xi_1}(t, 1)$, $\ddot{T}_{\xi_2}(t, 1)$. Це відбувається за такими співвідношеннями:

Якщо ритм змінний $\hat{T}_{\xi_1}(t, 1), t \in \dot{\mathbf{W}}$ для сегментної циклічної структури $\hat{\mathbf{D}}_c$:

$$\hat{T}_{\xi_1}(t, 1) = \begin{cases} \hat{t}_{i+1} - \hat{t}_i \neq \hat{t}_{i+2} - \hat{t}_{i+1} \neq \dots, \\ \hat{t}_{j+1} - \hat{t}_j \neq \hat{t}_{j+1} - \hat{t}_j \neq \dots, \end{cases} \quad (2)$$

Якщо ритм постійний $\hat{T}_{\xi_1}(t,1)$, $t \in \dot{\mathbf{W}}$ для сегментної зонної структури $\dot{\mathbf{D}}_z$:

$$\hat{T}_{\xi_1}(t,1) = \begin{cases} \hat{t}_{i+1} - \hat{t}_i = \hat{t}_{i+2} - \hat{t}_{i+1} = \dots = \hat{T}_{\xi_1}, \\ \hat{t}_{j+1} - \hat{t}_j = \hat{t}_{j+1} - \hat{t}_j = \dots, \hat{T}_{\xi_1} = \sum_{j=1}^z \hat{T}_j, \end{cases} \quad (3)$$

де \hat{T}_j – тривалість j -го сегменту-зони на i -му сегменті-циклу.

Аналогічним чином оцінюється ритмічна структура для другої частини сигналу $\ddot{T}_{\xi_2}(t,1)$ чи значення періоду \ddot{T}_{ξ_2} .

4. Наступним кроком є оцінювання статистичних характеристик частин сигналу з врахуванням їх ритмічної структури. На цьому етапі отримують оцінки математичних сподівань та дисперсії для першої $\hat{m}_{\xi_1}(t)$, $\hat{d}_{\xi_1}(t)$ та другої $\ddot{m}_{\xi_2}(t)$, $\ddot{d}_{\xi_2}(t)$ частин сигналу використовуючи співвідношення (4), (5), методи статистичної обробки описані в роботі [10].

$$\hat{m}_{\xi_1}(t) = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^{\dot{C}} \xi_{1\omega}(t + \hat{T}_{\xi_1}(t,1)), t \in \dot{\mathbf{W}}_1, \ddot{m}_{\xi_2}(t) = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^{\ddot{C}} \xi_{2\omega}(t + \ddot{T}_{\xi_2}(t,1)), t \in \ddot{\mathbf{W}}_1, \quad (4)$$

де $\dot{\mathbf{W}}_1$, $\ddot{\mathbf{W}}_1$ області визначення першого циклу відповідних частин сигналу.

$$\begin{aligned} \hat{d}_{\xi_1}(t) &= \frac{1}{C-1} \sum_{i=1}^{\dot{C}} \left(\xi_{1\omega}(t + \hat{T}_{\xi_1}(t,1)) - \hat{m}_{\xi_1}(t + \hat{T}_{\xi_1}(t,1)) \right)^2, t \in \dot{\mathbf{W}}_1 \\ \ddot{d}_{\xi_2}(t) &= \frac{1}{C-1} \sum_{i=1}^{\ddot{C}} \left(\xi_{2\omega}(t + \ddot{T}_{\xi_2}(t,1)) - \ddot{m}_{\xi_2}(t + \ddot{T}_{\xi_2}(t,1)) \right)^2, t \in \ddot{\mathbf{W}}_1 \end{aligned} \quad (5)$$

5. Після отримання статистичних оцінок відбувається їх нормування, при цьому область визначення нормованих оцінок приймається рівною області визначення першого сегменту-циклу чи сегменту-зони $\mathbf{W}_n = \mathbf{W}_1$, а тривалість нормованого циклу буде рівна відповідно тривалості першого циклу $T_i = \hat{T}_1$. Для нормування статистичних оцінок використовуємо співвідношення для відповідних частин сигналу:

$$\hat{m}_i(t) = \hat{m}_{\xi_1}\left(t \cdot \frac{\hat{T}_1}{T_i}\right), t \in \mathbf{W}_i, \hat{d}_i(t) = \hat{d}_{\xi_1}\left(t \cdot \frac{\hat{T}_1}{T_i}\right), t \in \mathbf{W}_i, \quad (6)$$

$$\ddot{m}_i(t) = \ddot{m}_{\xi_2}\left(t \cdot \frac{\ddot{T}_1}{T_i}\right), t \in \mathbf{W}_i, \ddot{d}_i(t) = \ddot{d}_{\xi_2}\left(t \cdot \frac{\ddot{T}_1}{T_i}\right), t \in \mathbf{W}_i. \quad (7)$$

6. На завершальному етапі відбувається перевірка статистичної гіпотези. На цьому етапі враховуються особливості реалізації статистичних оцінок характеристик сигналу для двох його частин. При цьому формуються оцінки інтервалів довіри $\dot{v}_{\max}(t)$, $\dot{v}_{\min}(t)$, $\ddot{v}_{\max}(t)$, $\ddot{v}_{\min}(t)$ для відповідних частин сигналу (взяті з ймовірністю $p = 0,997$). Інтервали довіри формуються за співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \dot{v}_{\max}(t) &= \hat{m}_i(t) + 3 \cdot \sqrt{\hat{d}_i(t)}, t \in \mathbf{W}_i, \dot{v}_{\min}(t) = \hat{m}_i(t) - 3 \cdot \sqrt{\hat{d}_i(t)}, t \in \mathbf{W}_i \\ \ddot{v}_{\max}(t) &= \ddot{m}_i(t) + 3 \cdot \sqrt{\ddot{d}_i(t)}, t \in \mathbf{W}_i, \ddot{v}_{\min}(t) = \ddot{m}_i(t) - 3 \cdot \sqrt{\ddot{d}_i(t)}, t \in \mathbf{W}_i \end{aligned} \quad (8)$$

Оскільки відомий факт про нормальність розподілу значень циклічних сигналів для яких поведились експерименти. Тому, використовуємо визначені інтервали довіри (8). Слід зазначити, що при дослідженні сигналів значення яких мають розподіл відмінний від нормального слід врахувати інші, встановлені, вагомні властивості характеристик досліджуваних сигналів і відповідно врахувати інший статистичний критерій в блоці «врахування особливостей статистичних оцінок характеристик циклічних сигналів», рисунок 1.

На цьому етапі припускається, що оцінки імовірнісних характеристик одної частини сигналу мають бути стохастично еквівалентні (стохастичний випадок), або рівні, чи перебувати в певному інтервалі (детермінований випадок). За такого підходу статистичні оцінки першої частини сигналу мають знаходитися в межах коридору довіри визначеного через статистичні оцінки другої частини сигналу і навпаки. При цьому висувається гіпотеза H_1 – коли досліджуваний сигнал є циклічним, (який може мати змінний чи

постійний ритм (періодичний); і протилежна, альтернативна гіпотеза H_2 – коли досліджуваний сигнал не є циклічним. При цьому критерій порівняння статистичних оцінок для описаних гіпотез подано у вигляді:

$$H = \begin{cases} H_1, & \begin{cases} \dot{v}_{\min}(t) < \dot{m}_i(t) < \dot{v}_{\max}(t), t \in W_i, \\ \dot{v}_{\min}(t) < \ddot{m}_i(t) < \dot{v}_{\max}(t), t \in W_i; \end{cases} \\ H_2, & \text{і дè і ааèèі і àі і³ оі і â ÷è оі і âè} \end{cases} \quad (8)$$

Алгоритмічне забезпечення розробленого методу верифікації циклічності досліджуваного сигналу подано у вигляді структурної схеми на рисунку 1. На рис. 2–12 надані як приклад етапи верифікації циклічності тестового сигналу, рис. 2.

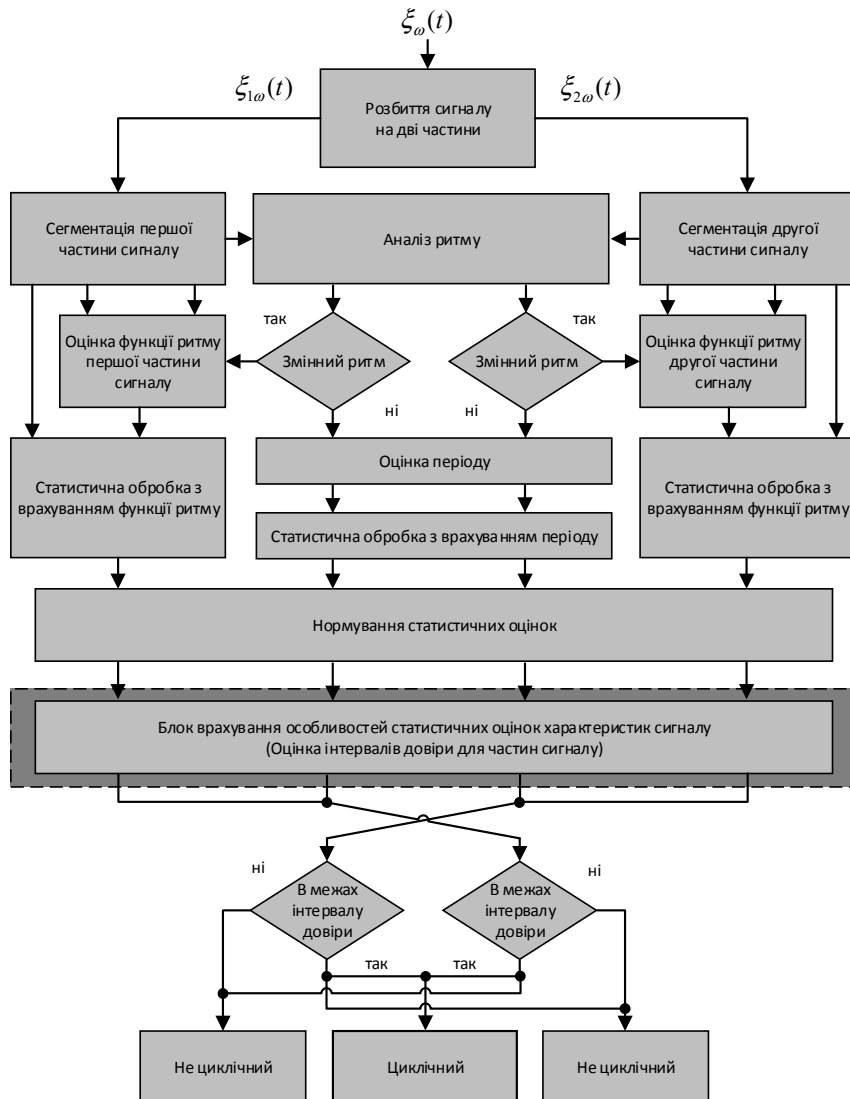


Рис. 1. Структурна схема алгоритмічного забезпечення методу верифікації циклічності (оцінки досліджуваного сигналу на приналежність до циклічних сигналів)

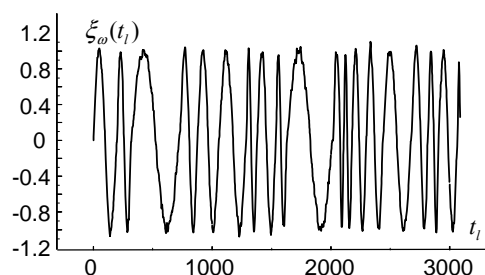
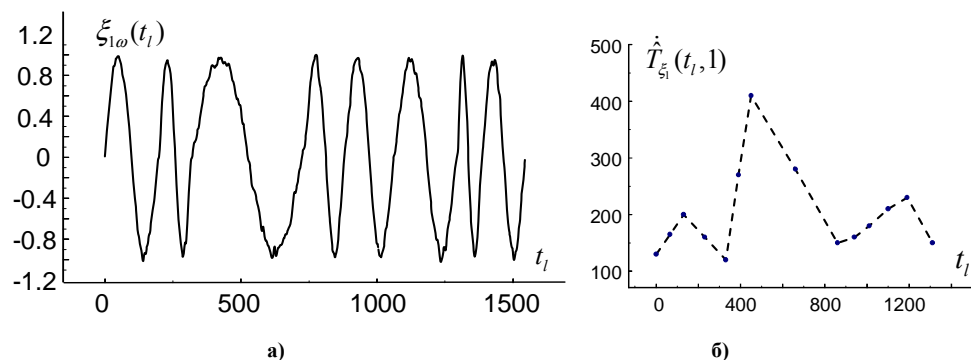


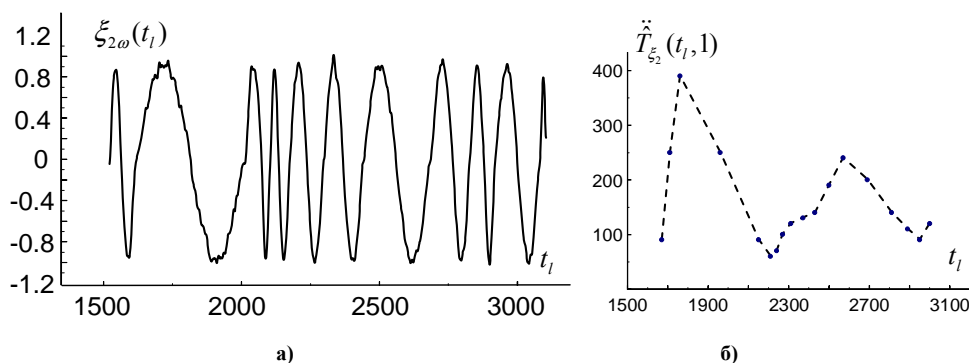
Рис. 2. Тестова реалізація для перевірки методу верифікації циклічності

Результати застосування методу верифікації циклічності досліджуваного сигналу на приналежність до циклічних сигналів.



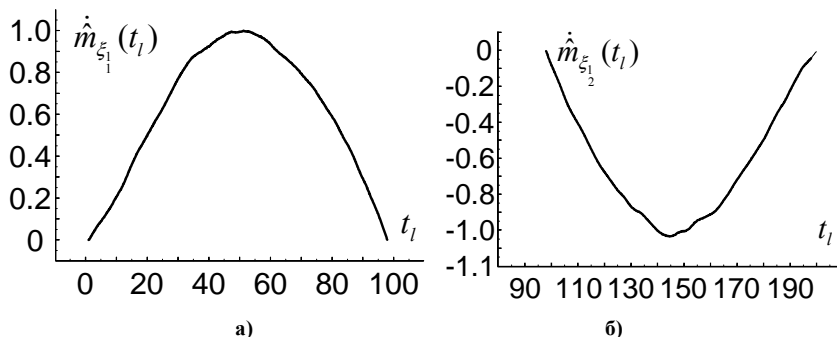
а) перша частина сигналу; б) оцінена ритмічна структура першої частини сигналу

Рис. 3. Перша частина досліджуваного сигналу та оцінена ритмічна структура (дискретна функція ритму), пунктиром позначена кусково-лінійна функція ритму



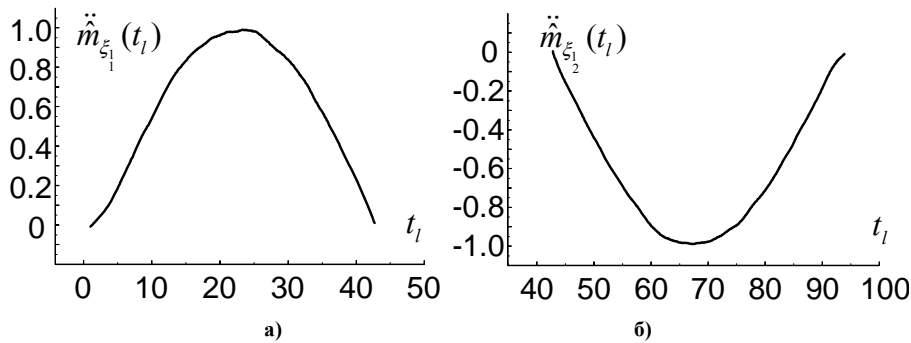
а) друга частина сигналу; б) оцінена ритмічна структура другої частини сигналу

Рис. 4. Друга частина досліджуваного сигналу та оцінена ритмічна структура (дискретна функція ритму), пунктиром позначена кусково-лінійна функція ритму



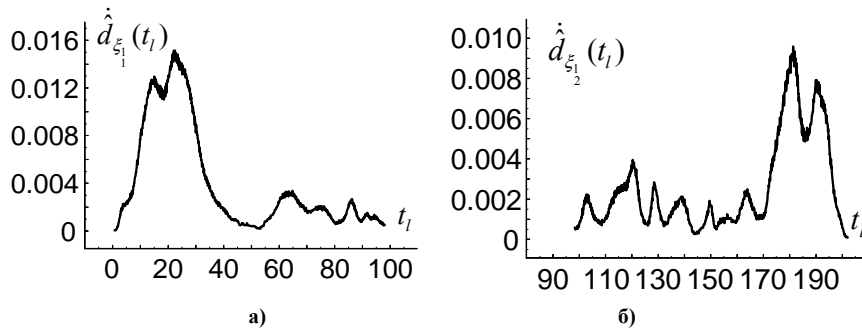
а) перший сегмент-зона, б) другий сегмент-зона

Рис. 5. Реалізації оцінок математичних сподівань першої частини сигналу для сегментів-зон

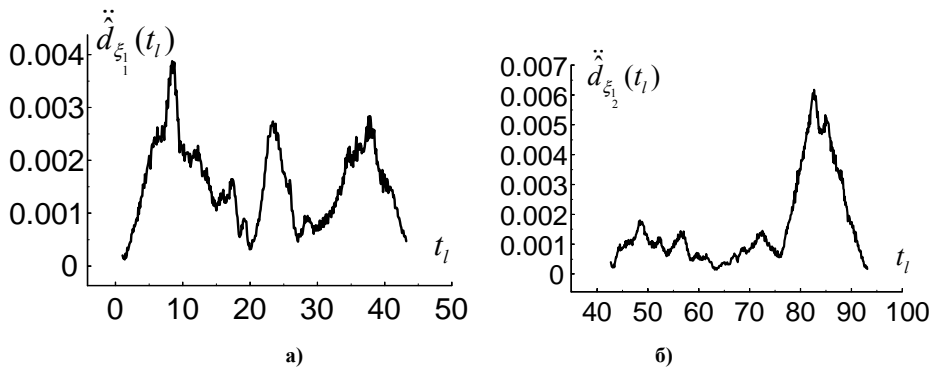


а) перший сегмент-зона, б) другий сегмент-зона

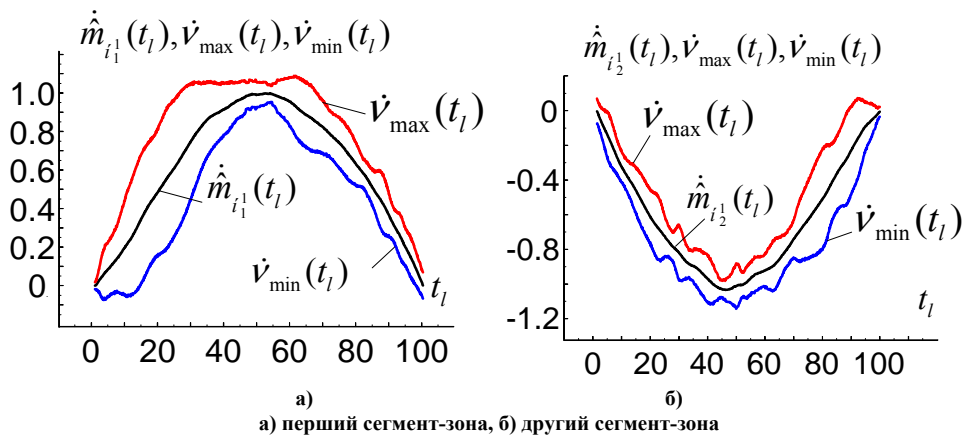
Рис. 6. Реалізації оцінок математичних сподівань другої частини сигналу для сегментів-зон



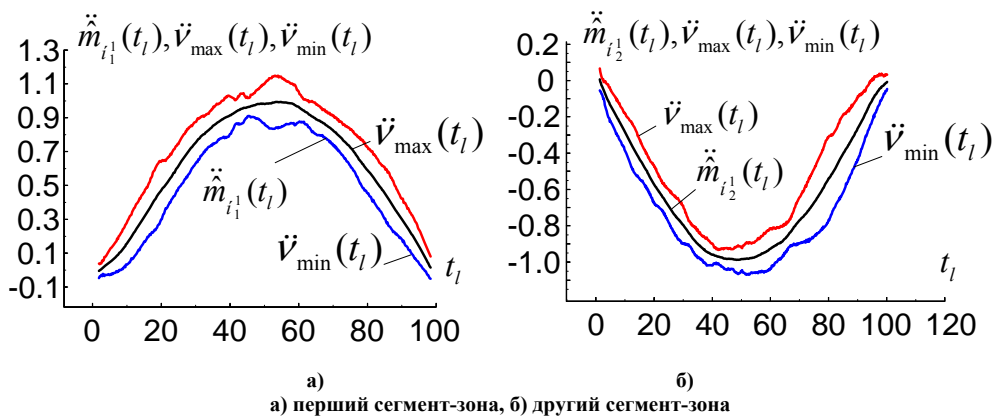
а) перший сегмент-зона, б) другий сегмент-зона
 Рис. 7. Реалізації оцінок дисперсій першої частини сигналу для сегментів-зон



а) перший сегмент-зона, б) другий сегмент-зона
 Рис. 8. Реалізації оцінок дисперсій другої частини сигналу для сегментів-зон



а) перший сегмент-зона, б) другий сегмент-зона
 Рис. 9. Інтервали довіри нормованих реалізацій оцінок (математичного сподівання та дисперсії) першої частини сигналу, (ймовірність довіри $p = 0,997$)



а) перший сегмент-зона, б) другий сегмент-зона
 Рис. 10. Інтервали довіри нормованих реалізацій оцінок (математичного сподівання та дисперсії) другої частини сигналу, (ймовірність довіри $p = 0,997$)

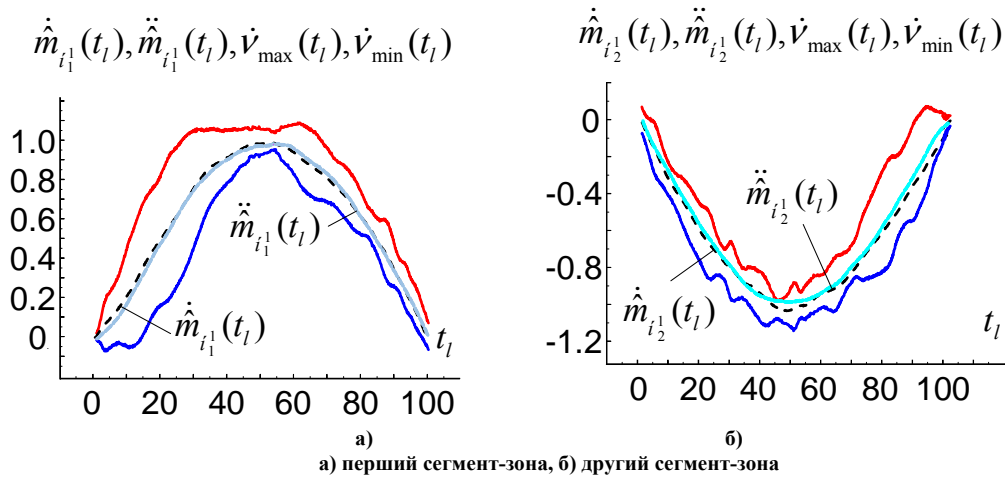


Рис. 11. Інтервали довіри нормованих реалізацій оцінок першої частини сигналу та математичне сподівання другої частини сигналу

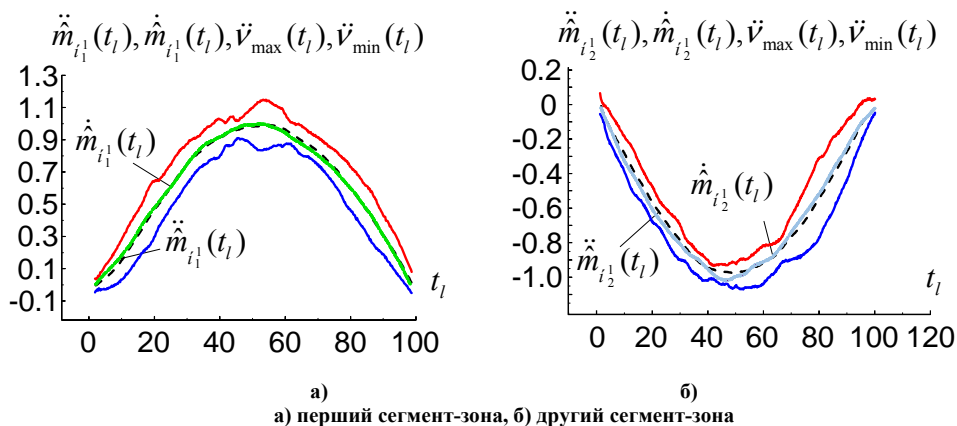


Рис. 12. Інтервали довіри нормованих реалізацій оцінок другої частини сигналу та математичне сподівання першої частини сигналу

Для даного прикладу отримані статистичні оцінки математичних сподівань відповідних сегментів-зон першої частини сигналу знаходяться в інтервалах довіри визначених через статистичні оцінки математичних сподівань та дисперсій відповідних сегментів-зон другої частини сигналу, що підтверджує висунуту гіпотезу H_1 – досліджуваний сигнал є циклічним. Слід зазначити, що при застосуванні методу у випадку коли ідентифікована сегментна-зонна структура необхідно проводити верифікацію циклічності окремо для відповідних сегментів-зон (як це надано на рис. 5–12). А у випадку ідентифікованої сегментної циклічної структури проводити верифікацію для відповідних сегментів-циклів.

Висновки. У роботі розроблено метод верифікації циклічності (оцінки досліджуваного сигналу на приналежність до циклічних сигналів). Запропоновано узагальнений підхід до розв'язання цієї задачі в рамках двох підходів детермінованого та стохастичного. Наведено приклад верифікації тестового сигналу. Розроблений метод верифікації циклічності дозволяє оцінити чи досліджуваний сигнал має повторювану структуру і чи характеристики структури є подібними. В ході встановлення факту приналежності досліджуваного сигналу до циклічних можна коректно застосовувати до його опрацювання весь розроблений апарат методів: статистичної обробки, методів оцінювання ритмічної структури та методів моделювання циклічних сигналів.

Розроблений метод може бути використаний при проведенні досліджень циклічних сигналів в медицині, економіці, механіці та інших галузях науки та техніки. Даний метод можна модифікувати шляхом зміни блоку математичного забезпечення, який враховує факт Гаусовості розподілу значень досліджуваного сигналу на врахування інших особливостей характеристик сигналів, які будуть досліджуватись.

Література

1. Литвиненко Я. Статистичний метод визначення зонної структури електрокардіосигналу в автоматизованих діагностичних системах / Я. Литвиненко, С. Лупенко, Л. Щербак // Вісник Тернопільського державного технічного університету. — Тернопіль, 2005. — Т. 10, № 3. — С. 165–175.
2. Lytvynenko I.V., Marushchak P.O. Analysis of the State of the Modified Nanotitanium Surface with the Use of the Mathematical Model of a Cyclic Random Process. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 254–263.

3. Лупенко С. Циклічні та періодичні випадкові процеси із зонною часовою структурою та їх ймовірнісні характеристики / С. Лупенко // Вісник Тернопільського державного технічного університету. — Тернопіль, 2006. — Т. 11, № 2. — С. 150–155.
4. Лупенко С.А. Теоретичні основи моделювання та опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах : монографія / Лупенко С.А. — Львів : Вид-во Магнолія 2006, 2016. — 343 с.
5. Lytvynenko I.V. Method of segmentation of determined cyclic signals for the problems related to their processing and modeling / I.V. Lytvynenko / Scientific Journal of the ternopil national technical university. 2018, Vol. 88, No. 4, pp. 153–169.
6. Лупенко С. Особливості дискретизації циклічних функцій / С. Лупенко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — Хмельницький, 2006. — № 1. — С. 64–70.
7. Лупенко С. А. Завдання інтерполяції функції ритму циклічної функції з відомою зонною структурою / С. А. Лупенко // Електроніка та системи управління / Національний авіаційний університет. — Київ, 2007. — № 2 (12). — С. 27–35.
8. Lytvynenko I.V. Method of the quadratic interpolation of the discrete rhythm function of the cyclical signal with a defined segment structure / I.V. Lytvynenko / Scientific Journal of the ternopil national technical university. 2016, Vol. 84, No. 4, pp. 131–138.
9. Литвиненко Я.В. Метод інтерполяції кубічним сплайном дискретної функції ритму циклічного сигналу із визначеною сегментною структурою / Я.В. Литвиненко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — Хмельницький, 2017. — № 3. — С. 105–112.
10. Лупенко С. А. Статистичні методи обробки циклічного випадкового процесу / С. А. Лупенко // Електроніка та системи управління / Національний авіаційний університет. — Київ, 2006. — № 2 (8). — С. 59–65.
11. Литвиненко Я. В. Імітаційне моделювання взаємопов'язаних економічних процесів на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів / Я. В. Литвиненко, С. А. Лупенко, Н. Р. Дем'янчук, А. Б. Горкуненко // Електроніка та системи управління / Національний авіаційний університет. — Київ, 2011. — № 2 (28). — С. 133–141.
12. Литвиненко Я. В. Діагностичні ознаки в комп'ютерних системах діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини / Я. В. Литвиненко, С. А. Лупенко, А. С. Сверстюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — Хмельницький, 2010. — № 1. — С. 182–188.
13. Горкуненко А. Б. Обґрунтування діагностичних і прогностичних ознак в інформаційних системах аналізу та прогнозування циклічних економічних процесів / А. Б. Горкуненко, С. А. Лупенко // Науковий вісник НЛТУ України : збірник науково-технічних праць. — Львів, 2012. — Вип. 22.9. — С. 347–352.

References

1. Lytvynenko I., Lupenko S., Shcherbak L. Statystychnyy metod vyznachennya zonnoyi struktury elektrokardiosyhnalu v avtomatyzovanykh diahnostychnykh systemakh, Visnyk Ternopil'skoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu, Ternopil', 2005, Vol. 10, No. 3, pp. 165-175.
2. Lytvynenko I.V., Marushchak P.O. Analysis of the State of the Modified Nanotitanium Surface with the Use of the Mathematical Model of a Cyclic Random Process. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2015, Vol. 51, No. 3, pp. 254-263.
3. Lupenko S. Cyclic and periodic random processes with zone timed structure and its probable characteristics / S. Lupenko // The Herald of the Ternopil State Technical University. - Ternopil, 2006. - Vol. 11, № 2. - P. 150-155.
4. Lupenko S.A. Teoretychni osnovy modelyuvannya ta opratsyuvannya tsyklichnykh syhnaliv v informatsiynykh systemakh. Monohrafiya, L'viv, Mahnoliya 2006, 2016. 343 p.
5. I.V. Lytvynenko. Method of segmentation of determined cyclic signals for the problems related to their processing and modeling/ I.V. Lytvynenko / Scientific Journal of the ternopil national technical university. 2018, Vol. 88, No. 4, pp. 153-169.
6. Lupenko S. Osoblyvosti dyskretyzatsiyi tsyklichnykh funktsiy. Vymiryval'na ta obchyslyval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh, Khmel'nyts'kyu, 2006. No. 1. pp. 64–70.
7. Lupenko S. A. Zavdannja interpoljacii' funkciij' rytmu cyklichnoi' funkciij' z vidomoju zonnoju strukturoju. S. A. Lupenko. Elektronika ta systemy upravlinnja. Nacional'nyj aviacijnyj universytet. Kyjiv, 2007. No 2 (12). pp. 27–35.
8. I.V. Lytvynenko. Method of the quadratic interpolation of the discrete rhythm function of the cyclical signal with a defined segment structure / I.V. Lytvynenko / Scientific Journal of the ternopil national technical university. 2016, Vol. 84, No. 4, pp. 131-138.
9. Lytvynenko I.V. Metod interpoljacii' kubichnym splajnom dyskretnoi' funkciij' rytmu cyklichnogo syhnalu iz vyznachenomu segmentnoju strukturoju / Lytvynenko I.V. // Vymirjuvalna ta obchyslyvalna tekhnika v tehnologichnyh procesah, Khmel'nyts'kyu, 2017. No. 3. pp. 105–112.
10. Lupenko S.A. Statistical methods of processing cyclic random process / S.A. Lupenko // Electronics and control systems / National Aviation University - Kyiv, 2006. - № 2(8). - P. 59-65.
11. Lytvynenko I.V., Lupenko S.A., Demyanchuk N.R., Horkunenko A.B. Imitatsiyne modelyuvannya vzajemopovyazanykh ekonomichnykh protsesiv na osnovi vektora tsyklichnykh rytmichno povyazanykh vypadkovykh protsesiv. Elektronika ta systemy upravlinnja. Natsional'nyj aviacijnyj universytet, Kyjiv, 2011. Vol. 28, No. 2. pp. 133–141.
12. Lytvynenko I.V. Diagnostychni oznaky v komp'juternykh systemah diaagnostyky funkcionalnogo stanu sercevo-sudynnoi' systemy ljudyny. I.V. Lytvynenko, S. A. Lupenko, A. S. Sverstjuk. Herald of Khmelnytskyi National University. Khmel'nyts'kyu, 2010. № 1. pp. 182–188.
13. Gorkunenko A. B. Obgruntuvannja diagnostychnykh i prognostychnykh oznak v informacijnykh systemah analizu ta prognozuvannja cyklichnykh ekonomichnykh procesiv. A. B. Gorkunenko, S. A. Lupenko. Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy: zbirnyk nauково-tekhnichnykh prac. L'viv, 2012. No. 22.9. pp. 347–352.

Рецензія/Peer review : 12.05.2018 р.

Надрукована/Printed : 11.07.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Лупенко С.А.