

УДК 621.391.7:612.172.2

Б. Яворський, докт. техн. наук; Ю. Лещишин

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСТОВІРНІСТЬ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗЛАДКИ РИТМОКАРДІОСИГНАЛУ

Резюме. Отримано характеристики достовірності методів визначення розладки ритмокардіосигналу. Обґрунтовано вибір критерію ефективності відповідного методу. Проведено порівняння достовірності методів визначення розладки ритмокардіосигналу, тестова статистика яких отримана синфазним методом, методом періодограм, методом Берга, методом Уелча.

Ключові слова: ритмокардіосигнал, визначення розладки, достовірність, періодично корельована випадкова послідовність, критерій Неймана-Пірсона.

B. Yavorskyu, Yu. Leschyshyn

RELIABILITY OF METHOD FOR CHANGE-POINT DETECTION OF RHYTHM-CARDIOSIGNAL

Summary. While analyzing the heart rate variability the sequence of time intervals between RR teeth – rhythmocardiosignal is analyzed with the help of the methods based on its stationary model. Different changes in the physical activity, physiological state of a human and environmental factors cause sufficient changes in the statistical characteristics of rhythmocardiosignal – their change-point and nonstationarity, which results in the decrease of the reliability of the rhythmocardiosignal variability parameters estimation. Thus, the mathematical model of rhythmocardiosignal, which varies from stationary to periodically correlated stochastic sequence, was built to take into account the rhythmocardiosignal change-point appearance.

The method of change-point detection of rhythmocardiosignal will be based on the comparison with a threshold of the likelihood ratio test statistic. The threshold of change-point detection of rhythmocardiosignal is obtained due to the Neumann-Pearson criterion, when the probability of false change-point detection is set. The test statistic of the change-point detection of rhythmocardiosignal is obtained taking advantage of the methods of spectral analysis, the synphase method, the periodogram method, the Berg and Welch methods in particular. The reliability of decisions on the appearance of the change-point of rhythmocardiosignal, ie the probability of the correct detection of the change-point, which accounts the statistical nature of the appearance of the rhythmocardiosignal change-point, was used as the criterion of methods efficiency of the change-point detection of rhythmocardiosignal.

The characteristics of the reliability of the methods of change-point detection of rhythmocardiosignal, which were selected as the criterion of their efficiency, have been obtained. The comparison of the reliability of the methods of the change-point detection of rhythmocardiosignal, the test statistics of which was obtained taking advantage of the synphase method, the periodogram method, the Berg method, the Welch method, has been carried out.

The obtained results testify that the reliability of change-point detection of rhythmocardiosignal by the synphase method is in 2 times higher then that obtained by the periodogram method, in to 1,8 times by the Berg method and in 1,4 times by the Welch method, the probability of a false change-point detection being up to 0,1 and relation to 4dB of the nonstationary energy to power spectral density of the stationary rhythmocardiosignal.

Key words: rhythmocardiosignal, change-point detection, reliability, periodically correlated stochastic sequence, the Neyman-Pearson criterion.

Вступ. Інформативною ознакою серцевого ритму є його варіабельність, яка проявляється через мінливість значень часових інтервалів поміж RR зубцями електрокардіосигналу [1]. Аналіз варіабельності серцевого ритму використовують для діагностування серцево-судинних, психічних та інших захворювань на початкових їх стадіях [1, 2]. Послідовність часових інтервалів поміж RR зубцями (ритмокардіосигнал – РКС) стандартом [2] рекомендовано аналізувати методами, що базуються на її моделі – стаціонарній випадковій послідовності другого порядку [1, 2]. Стаціонарності РКС досягають шляхом штучно створених стаціонарних, не змінних умов при його відборі

або шляхом аналізу короткотривалих відрізків, до 5 хвилин, вибраних оператором вручну [1, 2]. Однак при застосуванні систем голтерівського моніторингу, для аналізу варіабельності серцевого ритму, в повсякденній діяльності людини або при функціональних тестах досягнути незмінних умов спостереження неможливо.

Раптові зміни фізичного навантаження та фізіологічного стану людини, чинників навколишнього середовища тощо викликають зміну статистичних характеристик РКС – їх розладку та не стаціонарність [3]. Це призводить до зменшення достовірності результатів автоматизованого оцінювання параметрів варіабельності РКС.

Для нестаціонарних відрізків РКС існують нові математичні моделі для перехідного процесу РКС [4] та нестаціонарного (періодично корельованого) РКС [5], які не внесені до стандартів. На їх базі розроблено методи аналізу варіабельності серцевого ритму для нестаціонарних відрізків РКС. Ці моделі враховують стаціонарну модель, однак не зазначають розладки статистичних характеристик РКС.

Автоматизація аналізу РКС у системах голтерівського моніторингу є важливою для встановлення зміни функціонального стану людини без участі оператора й потребує ефективного визначення розладки РКС, який ускладнюється тим, що часові моменти розладки є невідомими і випадковими.

Мета роботи – розроблення автоматизованих методів визначення розладки РКС, оцінювання та порівняння їх ефективності за критерієм, що враховує статистичну природу РКС.

Постановка задачі. Задачі визначення розладки розв’язували в радіотехніці [6] і трактували як різку зміну параметрів сигналів (математичного сподівання, дисперсії або поява сигналу в шумі). На базі розроблених у радіотехніці моделей та методів у [7, 8] побудовано математичну модель РКС, що враховує появу розладки РКС і змінюється від стаціонарної до періодично корельованої випадкової послідовності (ПКВП), що змінює свої характеристики (див. рис.1) у момент часу τ :

$$\xi(t) = \eta(t) + \theta(t) \cdot \zeta(t), \quad \theta(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < \tau \\ 1, & \tau \leq t \leq T_R \end{cases}, \quad (1)$$

де $\theta(t)$ – індикаторна функція, що вказує на появу розладки РКС; $\eta(t)$ – стаціонарна послідовність (білий шум); $\zeta(t)$ – періодична детермінована функція, що відображає пристосування організму до нових умов. РКС є випадковою послідовністю із дискретним часом $t = m T_R$, де T_R – період дискретизації РКС, $m \in N$. Значення індикаторної функції $\theta(t)$ є апіорно невідомим і може набувати тільки одне з двох значень: $\theta = 0$ (стаціонарний РКС, подія H_0), $\theta = 1$ (поява розладки РКС, подія H_1), при $t = \tau$ відбувається зміна індикаторної функції $\theta(t)$, що відповідає розладці РКС.

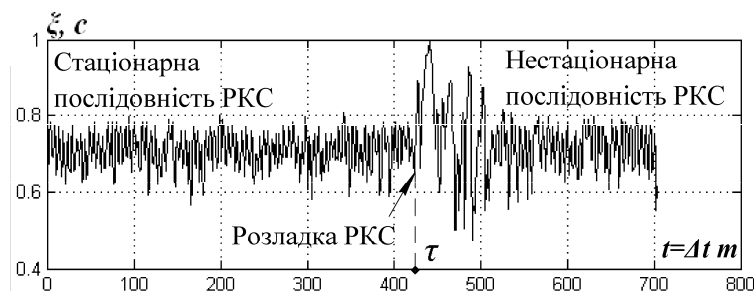


Рисунок 1. Часова послідовність РКС, що супроводжується розладкою

Figure 1. Time sequence of rhythmocardiosignal accompanied by the change-point

Критерієм ефективності прийнятого рішення про розладку РКС аналогічно як при виявленні сигналів [9] є характеристики достовірності прийнятого рішення. Тому за критерій ефективності методів визначення розладки РКС використано

характеристики достовірності визначення розладки РКС, що враховує статистичну природу її появи.

В задачі визначення розладки апріорно відомими є функції густини розподілу ймовірності значень стаціонарного РКС. Розв'язком задачі визначення розладки є апостеріорна інформація про появу розладки РКС та достовірність її визначення, яка отримується за результатами його опрацювання.

Метод визначення розладки РКС та критерій його ефективності. Відомі в радіотехніці методи визначення розладки [6] базуються на порівнянні відношення правдоподібності функцій густин розподілу реалізацій випадкової послідовності. Розроблений метод [7, 8] побудовано на порівнянні відношення правдоподібності тестової статистики q , отриманої методами спектрального аналізу реалізацій РКС, з порогом h

$$L = \frac{W_1(q)}{W_0(q)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} h, \quad (2)$$

де $W_1(q)$ та $W_0(q)$ – густини розподілу ймовірності тестової статистики q нестационарного (періодично корельованого) та стаціонарного РКС. Порівняння відношення правдоподібності тестової статистики здійснюється з порогом h , який отримуємо за критерієм Неймана–Пірсона, коли ймовірність помилкового визначення розладки p_f задається наперед.

За тестову статистику визначення розладки РКС q використано спектральну густину потужності, яку отримуємо, застосовуючи методи спектрального аналізу, зокрема вибрано синфазний метод, метод періодограм, методи Берга та Уелча. Для кожного методу спектрального аналізу властивий свій закон розподілу ймовірності тестової статистики: для синфазного методу – нормальний [10, 11], для методу періодограм – χ^2 – розподіл [9], для методів Берга та Уелча – гамма-розподіл [12, 13].

З а с т о с о в у ю ч и с и н ф а з н и й м е т о д до періодично корельованого РКС, отримуємо сукупність залежних від початкової фази стаціонарних (у широкому сенсі) випадкових послідовностей, для яких обчислюємо тестову статистику визначення розладки РКС q шляхом Фур'є перетворення кореляційної функції цих послідовностей [7, 8]. Отримані синфазним методом тестові статистики апроксимують нормальним розподілом [10, 11], тому поріг h визначення розладки РКС та достовірність визначення розладки обчислюємо за виразами (3, 4).

$$h = \sqrt{D_0} \Phi^{-1}(1 - p_f) + m_0, \quad (3) \quad p_d = 1 - \Phi\left(\frac{h - m_1}{\sqrt{D_1}}\right), \quad (4)$$

де $\Phi(\bullet)$ – функція Гауса; m_0, D_0 – математичне сподівання і дисперсія тестової статистики q при стаціонарному РКС; m_1, D_1 – математичне сподівання і дисперсія тестової статистики q при розладці РКС.

Д л я м е т о д у п е р і о д о г р а м характеристики достовірності визначення розладки РКС обчислюють за тестовою статистикою q , яку апроксимують χ^2 – розподілом [9], тому поріг h визначення розладки РКС та достовірність визначення розладки обчислюємо за виразами (5,6) [9]

$$h = D_0 \ln(1/p_f), \quad (5)$$

$$p_d = Q_M \left(\sqrt{\frac{2E}{N_0}}; \sqrt{\frac{4h}{m_0}} \right), \quad (6)$$

де Q_M – функція Маркума; E/N_0 – відношення енергії нестационарного до спектральної густини потужності стаціонарного РКС.

Для методів Берга та Уелча характеристики достовірності визначення розладки РКС обчислюють за тестовою статистикою q , яку апроксимують гамма-розподілом [12, 13]. Тому ймовірність помилкового визначення p_f та достовірність визначення розладки РКС p_d обчислюємо за виразами [12, 13]

$$p_f = 1 - \int_0^h \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} q^{\alpha-1} e^{-\frac{q}{\beta}} dq, \quad (7)$$

$$p_d = 1 - \int_0^h \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} q^{\alpha-1} e^{-\frac{q}{\beta}} dq \int_0^{h/N_0} \frac{1}{2} \left(\frac{q}{\delta} \right)^{\frac{\alpha-2}{4}} e^{-\frac{q-\delta}{2}} I_{\frac{\alpha-1}{2}}(\sqrt{\delta q}) dq, \quad (8)$$

де $\beta \approx \sqrt{D_0}$ та $\alpha \approx N_0/\sqrt{D_0}$ – параметри гамма-розподілу тестової статистики стаціонарного РКС; $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функція; $\delta = \sqrt{2E/N_0}$ – параметр нецентрального χ^2 розподілу; $I_{\frac{\alpha-1}{2}}(\sqrt{\delta q})$ – модифікована функція Бесселя.

При перевищенні порогу h отриманими таким чином тестовими статистиками (рис.2) приймається рішення про появу розладки РКС, тобто індикаторна функція $\theta(t)$ змінює своє значення (рис.3).

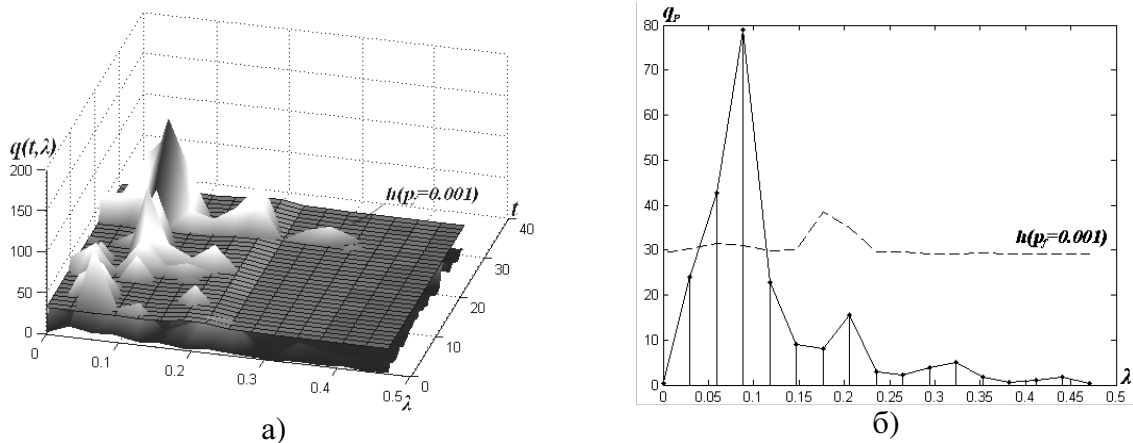


Рисунок 2. Визначення розладки РКС для тестової статистики нестационарного РКС, отриманої: а) синфазним методом (абсциса – частота, Гц.; ордината – час, с.; апліката – спектральна густина потужності, $s^2/Гц$); б) методом періодограм (абсциса – частота, Гц.; ордината – спектральна густина потужності, $s^2/Гц$)

Figure 2. Change-point detection of rhythmocardiogram for test statistic of the nonstationary rhythmocardiogram obtained by: a) synphase method (abscissa – frequency, Hz., ordinate – time, s.; applicants – power spectral density, s^2/Hz), b) periodogram method (abscissa – frequency, Hz., ordinate – power spectral density, s^2/Hz)

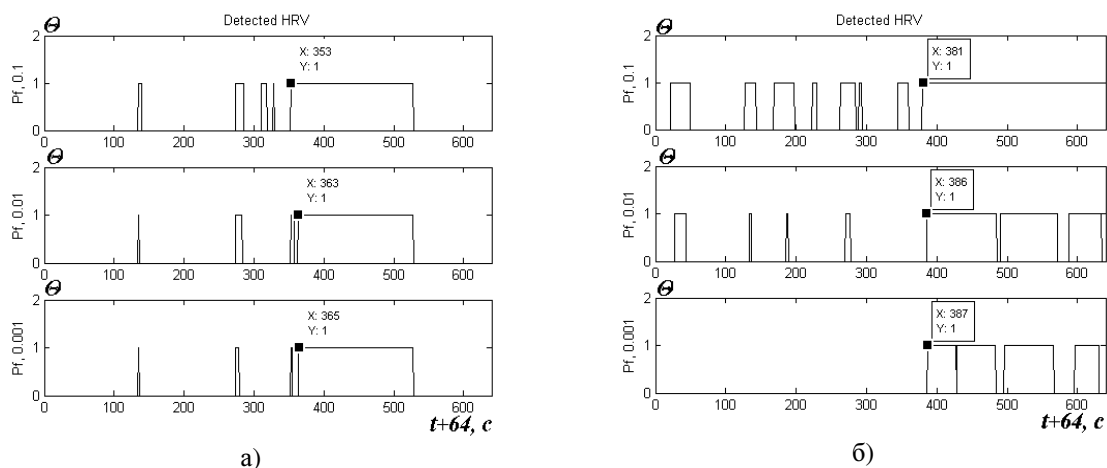


Рисунок 3. Визначена розладка РКС із застосуванням: а) синфазного методу; б) методу періодограм

Figure 3. Detected change-point of rhythmocardiosignal taking advantage of: a) synphase method, b) periodogram method

Результати досліджень. Отримані за виразами (4, 6, 8) характеристики достовірності визначення розладки РКС (рис.4) являють собою залежність ймовірності правильного визначення розладки p_d від відношення E/N_0 при фіксованій ймовірності помилкового визначення розладки p_f . За цими кривими оцінюємо достовірність визначення розладки, а також ефективність застосування різних методів спектрального аналізу для обчислення тестової статистики визначення розладки РКС.

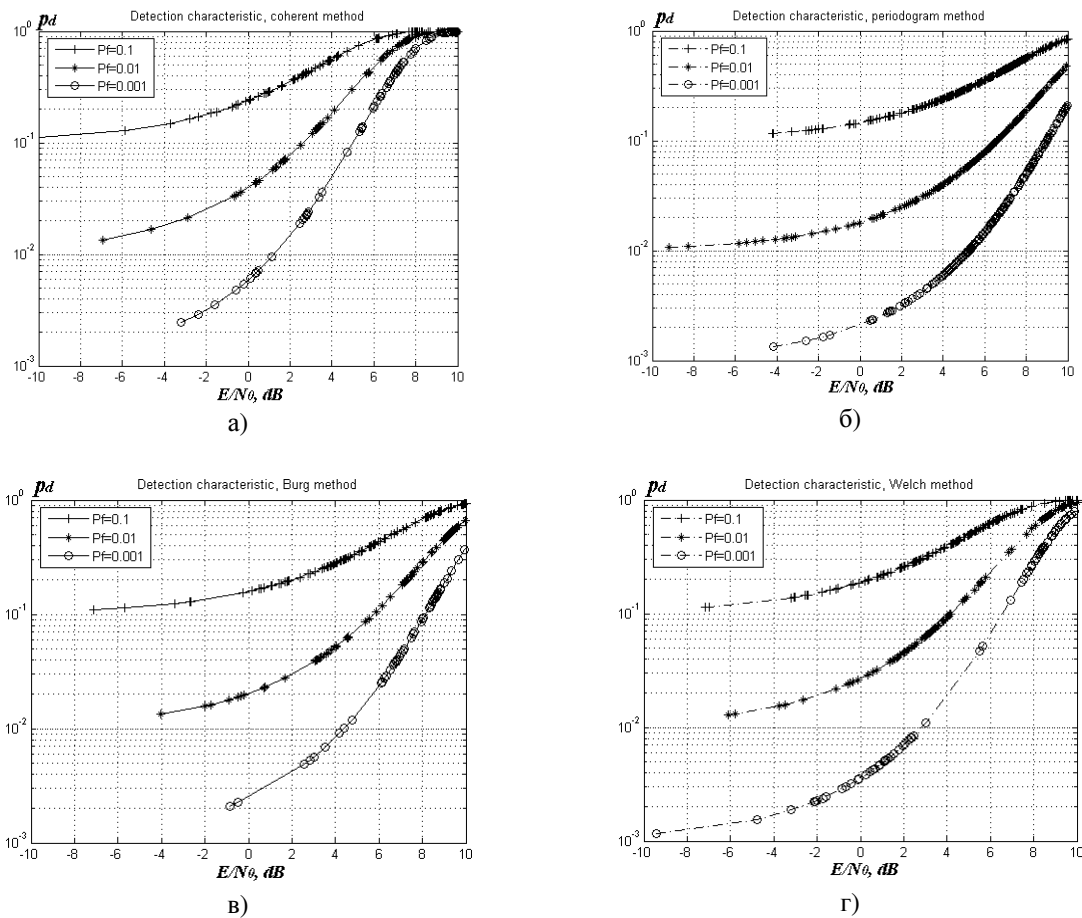


Рисунок 4. Характеристики достовірності визначення розладки РКС, обчислені за тестовими статистиками, отриманими: а) синфазним методом; б) методом періодограм; в) методом Берга; г) методом Уелча

Figure 4. Characteristics of reliability of the method of change-point detection of rhythmocardiogram signal calculated by the test statistic taking advantage of: a) synphase method; b) periodogram method; c) Berg method; d) Welch method

Отримані результати (див. рис.4) свідчать, що достовірність визначення розладки РКС p_d при застосуванні синфазного методу є вищою в порівнянні з методами періодограм в 2 рази, Берга – в 1,8 раза та Уелча – в 1,4 раза, при ймовірності помилкового визначення розладки 0,1 та відношенні $E/N_0=4$ дБ енергії нестационарного до спектральної густини потужності стаціонарного РКС.

Висновки. Обґрунтовано використання та отримано характеристики достовірності методів визначення розладки РКС, що уможливають порівняння їх ефективності та враховують статистичну природу появи розладки РКС. Зокрема, порівняно ефективність методів визначення розладки РКС, тестова статистика яких отримана синфазним методом, методом періодограм, методами Берга та Уелча. Достовірність визначення розладки РКС при застосуванні синфазного методу є вищою в порівнянні з іншими методами в 1,4–2 рази. Подальше порівняння ефективності методів визначення розладки РКС потребує тестування на сигналах, що представлені через складніші моделі (бі-ПКВП, полі-ПКВП), а також оцінювання точності визначення розладки РКС.

Conclusions. Characteristics of the reliability of the method of change-point detection of rhythmocardiogram signal, which make possible to compare their efficiency and to take into

account the statistical nature of the change-point methods of rhythmocardiogram appearance have been obtained and their application has been interpreted. The efficiency of the change-point detection of rhythmocardiogram was compared, the test statistics of which was obtained taking advantage of the synphase method, the periodogram method, the Berg method, the Welch method. The reliability of the change-point detection methods of rhythmocardiogram taking advantage of the synphase method is higher in 1,4–2 times as compared compared with the other ones. Further comparison of the efficiency of the change-point detection methods of rhythmocardiogram requires testing of signals, which are presented by more complicated models (bi-PCSS, poly-PCSS), as well as the accuracy estimation of change-point detection of rhythmocardiogram.

Список використаної літератури

1. Баевский, Р.М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем [Текст] / Р.М. Баевский и др. // Вестник аритмологии. – 2001. – №24. – С. 65–87.
2. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task force of the European society of cardiology and the North American society of pacing and electrophysiology // Eur.Heart J. – 1996. – Vol.17. – P.354–381.
3. Карпенко, Ю.Д. Изучение зависимости variability сердечного ритма от факторов внутренней и внешней среды [Текст] / Ю.Д. Карпенко // Фундаментальные исследования – 2011. – № 10 (часть 3). – С. 619–623.
4. Лозінська (Тиш), Є.В. Уточнена математична модель кардіоінтервалограми при фізичних навантаженнях [Текст] / Є.В. Лозінська (Тиш) // Електроніка та системи управління. – НАУ. – 2006. – №4 (10). – С. 71–77.
5. Яворська, Є. Властивості кореляційної функції дихальної variability ритміки серця [Текст] / Є. Яворська // Вісник ТДТУ. – 2005. – №1. – Т.10. – С. 134–144.
6. Жиглявский, А.А. Обнаружение разладки случайных процессов в задачах радиотехники [Текст] / А.А. Жиглявский, А.Е. Красковский. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1988. – 224с.
7. Яворський, Б.І. Метод визначення точки розладки ритмокардіосигналу [Текст] / Б.І. Яворський, Ю.З. Лещинин // Комп'ютерні науки та інформаційні технології // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – №694. – С. 107–113.
8. Лещинин, Ю.З. Виявлення періодично корельованої variability серцевого ритму за критерієм Неймана-Пірсона [Текст] / Ю.З. Лещинин // Комп'ютерні технології друкарства: зб. наук. праць. – 2007. – № 18. – С. 204–211.
9. Шахтарин, Б.И. Обнаружение сигналов: учеб. пособие [Текст] / Б.И. Шахтарин. – М.: Гелиос АРВ, 2006. – 488 с.
10. Dandawate, A.V. Statistical test for presence of cyclostationarity / A.V. Dandawate, G.B. Giannakis // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1994. – №9. – Vol. 42. – P. 2355–2369.
11. Sutton, P.D. Cyclostationary signatures in practical cognitive radio applications / P. D. Sutton, K. E. Nolan, and L. E. Doyle // IEEE J. Sel. Areas Commun. – 2008. – Vol. 26. – P. 13–24.
12. Comparison of Various Periodograms for Sinusoid Detection and Frequency Estimation / H.C. So, Y.T. Chan, Q. Ma and P.C. Ching // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems.– 1999.– Vol. 35. Iss. 3.– P.945–952.
13. Huns, E.K.L. Simulation experiments to compare the signal detection properties of DFT and MEM spectra / E.K.L.Huns, R.W.Herring // IEEE Tans. Acomt., Speech, Signal Processing.– 1981. – Vol.29. – №5.– P.1084–1089.

Отримано 04.11.2013