

## ТЕСТУВАННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗЛАДКИ РИТМОКАРДІОСИГНАЛУ

Проведено тестування методу визначення розладки ритмокардіосигналу на ритмокардіосигналах з різними характеристиками. Отримано характеристики достовірності методу визначення розладки ритмокардіосигналу для тестових ритмокардіосигналів та при застосуванні для обчислення тестової статистики методів спектрального аналізу. 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.

YU. LESCHYSHYN

Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil

## TESTING OF CHANGE-POINT DETECTION METHOD OF RHYTHMOCARDIOSIGNAL

Abstract – Test the method of change-point detection of rhythmocardiosignal on test rhythmocardiosignal with different characteristics. Get the reliability of the method change-point detection of rhythmocardiosignal for tests rhythmocardiosignal and when used to compute the test statistic various methods of spectral analysis.

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 got by Neumann-Pearson criterion, when the probability of false change-point detection is set. The test statistic of change-point detection of rhythmocardiosignal is obtained with the help of the methods of spectral analysis, specifically, there were selected the synphase method, the periodogram method, the Berg and Welch methods. The reliability of decisions about the appearance of the change-point of rhythmocardiosignal, is the probability of correct detection of the change-point which accounts the statistical character of the appearance of the rhythmocardiosignal change-point, was used as the criterion of methods efficiency of the change-point detection of rhythmocardiosignal.

There was carried out the comparison of the reliability methods of the change-point detection of rhythmocardiosignal, and their test statistics was obtained with the help of the usage of the synphase method, the periodogram method, the Berg method, the Welch method.

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

## Вступ

Важливою діагностичною характеристикою серцевого ритму є його варіабельність, яка проявляється через мінливість значень часових інтервалів поміж RR зубцями електрокардіосигналу. Варіабельність РКС використовують для діагностування серцево-судинних, психічних та ін. захворювань на початкових їх стадіях [1]. При цьому РКС вважають за стаціонарну [1] послідовність. Але зміна фізичного навантаження, фізіологічного стану людини та чинники навколишнього середовища випадковим чином викликають різку зміну статистичних характеристик РКС — їх розладку [2]. Застосування до фактично нестационарного РКС методів аналізу, що базуються на стаціонарній моделі, призводить до зменшення достовірності оцінок параметрів варіабельності РКС. Отже необхідна автоматизація визначення розладки РКС, що є важливою для встановлення зміни функціонального стану людини без участі оператора. Розроблення методів визначення розладки РКС потребує тестування та порівняння їх ефективності, за критерієм яким є достовірність прийнятого рішення про наявність розладки РКС, що враховує її стохастичну природу появи.

## Математична модель та метод визначення розладки РКС.

Математична модель РКС [3] враховує появу розладки РКС і змінюється від стаціонарної до періодично корельованої випадкової послідовності (ПКВП), що змінює свої характеристики в момент часу  $\tau$ :

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

де  $\theta(t)$ — індикаторна функція, що вказує на появу розладки РКС,  $\tau$ — точка розладки РКС,  $\eta(t)$ — стаціонарний РКС,  $\zeta(t)$ — періодична детермінована функція, що відображає пристосування організму до нових умов. Моменти часу є дискретними  $t = m T_R$ , де  $T_R$ — інтервал між відліками РКС  $1s$ ,  $m \in N$ . Параметр індикаторної функції  $\theta(t)$  є апіорно невідомим і приймає 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  $\theta$ , що відповідає розладці РКС.

Метод визначення розладки РКС базується на опрацюванні РКС методами спектрального аналізу та обчисленні за їх допомогою спектральної густини потужності РКС, що є тестовою статистикою визначення розладки РКС  $q$ . Тестова статистика є стаціонарною випадковою послідовністю в якій інформацію про розладку несе зміна математичного сподівання або дисперсії. Рішення про розладку приймається при порівнянні з порогом  $h'$  відношення правдоподібності [3] отриманої тестової статистики:

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

де  $W_1(q)$  та  $W_0(q)$  — густини розподілу імовірності тестової статистики  $q$  для нестационарного та стаціонарного РКС. При перевищенні тестовою статистикою  $q$  порогу  $h$  приймається рішення про появу розладки РКС.

Поріг визначення розладки РКС  $h$ , отримуємо за критерієм Неймана–Пірсона, коли імовірність помилкового визначення розладки  $p_f$  задається (3). Тоді імовірність правильного визначення розладки  $p_d$  (4) [3]:

$$h = \sqrt{D_0} \Phi^{-1}(1 - p_f) + m_0, \quad (3)$$

$$p_d = 1 - \Phi\left(\frac{h - m_1}{\sqrt{D_1}}\right), \quad (4)$$

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.

Для обчислення тестової статистики  $q$  використовують методи спектрального аналізу, зокрема використано синфазний метод, метод періодограм, методи Берга та Уелча. За критерій ефективності методів визначення розладки РКС використано достовірність прийнятих рішень про появу розладки РКС, тобто імовірність правильного визначення розладки  $p_d$ , що враховує стохастичну природу появи розладки РКС.

Характеристики достовірності визначення розладки РКС розраховуються за тестовою статистикою визначення розладки РКС  $q$ , яка для кожного методу відрізняється густинами розподілу імовірності для нестационарного  $W_1(q)$  та стаціонарного  $W_0(q)$  РКС. Для синфазного методу, густини розподілу імовірності тестової статистики  $q$  апроксимують нормальним розподілом [4], тому поріг  $h$  визначення розладки РКС та достовірність визначення розладки обчислюємо за виразами (3, 4).

Для методу періодограм густини розподілу тестової статистики  $q$ , апроксимують  $\chi^2$  – розподілом [5], тому поріг  $h$  визначення розладки РКС та достовірність визначення розладки обчислюємо за виразами (5, 6) [5]:

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

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

де  $Q_M$  — функція Маркума,  $E/N_0$  — відношення енергії нестационарного до спектральної густини потужності стаціонарного РКС.

Для методів Берга та Уелча густини розподілу імовірності тестової статистики  $q$ , апроксимують гамма розподілом [6]. Тому величини  $p_f$  та  $p_d$  визначаємо за виразами [6]:

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

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

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

Бесселя.

### Тестування методів визначення розладки РКС

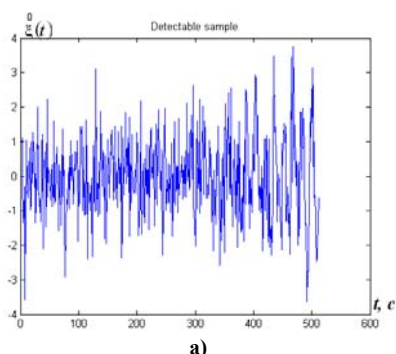
Тестування методів визначення розладки РКС проводилось на трьох сигналах. Два з них тестові з відомими параметрами і один відібраний за допомогою системи ГМ CardioSens, на базі Тернопільської міської комунальної лікарні № 2. Параметри тестових РКС:

1) Тестовий РКС №1 змінюється від стаціонарного до періодично корельованого РКС. Тобто, гаусів білий шум до 256 відліку, із розладкою та появою ПКВП з лінійним наростанням відношення  $E/N_0$  енергії нестационарного до спектральної густини потужності стаціонарного РКС з 256 відліку на частоті  $\lambda_0=1/16$  Гц, період корельованості  $T_K = 16$ , математичним сподіванням  $m_{\xi_1} = 0$ , дисперсією  $D_{\xi_1} = 0,1$ , тривалістю 512 відліків наведено на рис.1.

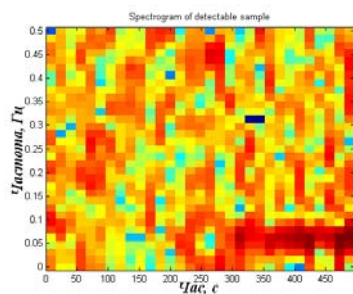
2) Тестовий РКС №2 має складнішу структуру і змінюється від ПКВП з одними параметрами до ПКВП з іншими параметрами. Тобто, ПКВП із незмінною спектральною густиною потужності на частотах  $\lambda_1=1/4$  Гц,  $\lambda_2=1/31$  Гц,  $\lambda_3=1/7$  Гц до 256 відліку; з розладкою та лінійним наростанням відношення  $E/N_0$

енергії нестационарного до спектральної густини потужності стаціонарного РКС з 256 відліку на частоті  $\lambda_0=1/16$  Гц, період корельованості  $T_K = 39$  с, математичним сподіванням  $m_{\xi 1} = 0$ , дисперсією  $D_{\xi 1} = 0,1$ , тривалістю 512 відліків наведено на рис.2.

3) Тестовий РКС №3 відібраний за допомогою системи ГМ CardioSens. При відборі тестового РКС використано методику проведення ортостатичної проби [7]. Для тестування використано відрізок тривалістю 704 відліки із розкладкою РКС при зміні положення тіла рис.3.

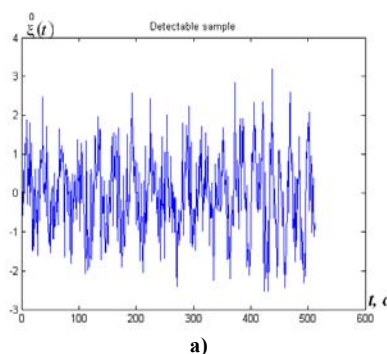


а)

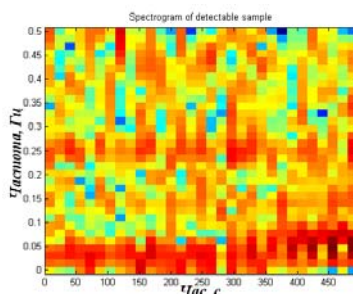


б)

Рис. 1. Тестовий РКС №1: а) відліки досліджуваної вибірки; б) її спектрограма

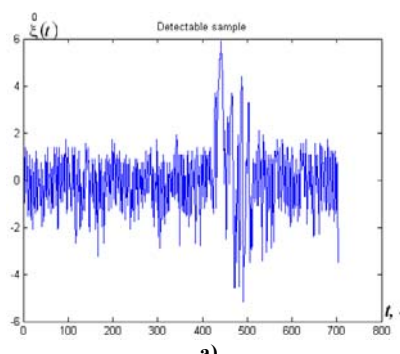


а)

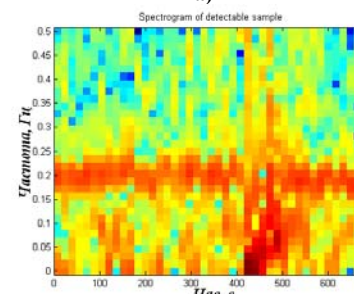


б)

Рис. 2. Тестовий РКС №2: а) відліки досліджуваної вибірки; б) її спектрограма



а)



б)

Рис. 3. Тестовий РКС №3: а) відліки досліджуваної вибірки з розкладкою; б) її спектрограма

Використовуючи тестові сигнали та вирази (4,6,8), отримано характеристики достовірності визначення розладки РКС (рис. 4-6), які являють собою залежність імовірності правильного визначення розладки  $p_d$  від відношення  $E/N_0$  при фіксованій імовірності помилкового визначення розладки  $p_f$ . За цими кривими оцінюємо достовірність визначення розладки, а також ефективність застосування різних методів спектрального аналізу.

Використання тестового РКС №1, що має “просту” структуру відповідає випадку коли всі параметри РКС відомі, що уможливує оптимальне налаштування методів спектрального аналізу (розміру і зсуву вікна, періоду корельованості та ін.) до структури РКС після його розладки, а отже зменшити втрати енергії на просочування і розмивання спектральних компонент тестової статистики визначення розладки РКС. Отримані характеристики достовірності визначення розладки РКС наведені на рис. 4.

Характеристики достовірності визначення розладки РКС, отримані для тестового РКС №1, наближаються до ідеальних [8], що зумовлено відомістю параметрів РКС до і після розладки та оптимальним налаштуванням методів спектрального аналізу до структури нестационарного РКС після його розладки.

На рис. 5 наведені характеристики достовірності визначення розладки РКС для тестового РКС №2, що відповідає складнішому випадку коли частково відомі параметри РКС і налаштування методів спектрального аналізу здійснюється для РКС до його розладки.

Характеристики достовірності визначення розладки РКС, що зображено на рис.5, дещо гірші від ідеальних, через те що методи спектрального аналізу не налаштовані до структури РКС після його розладки, а отже виникають втрати енергії РКС на розмивання і просочування при спектральному аналізі.

На рис. 6 наведені характеристики достовірності визначення розладки РКС для тестового РКС №3, що відповідає найскладнішому випадку коли не відомі параметри РКС і налаштування методів спектрального аналізу здійснюється за результатами оцінювання параметрів РКС до його розладки.

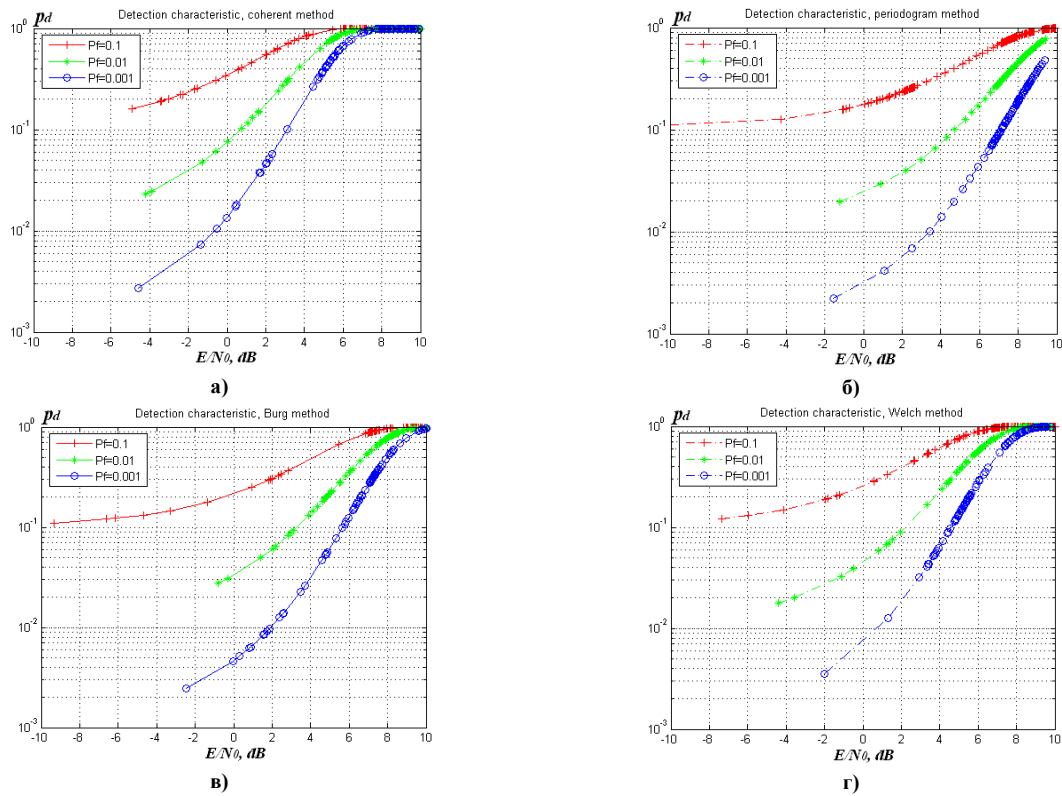


Рис. 4. Характеристики достовірності визначення розладки РКС (тестовий РКС №1) обчислені за тестовими статистиками отриманими: а) синфазним методом, б) методом періодограм, в) методом Берга, г) методом Уелча

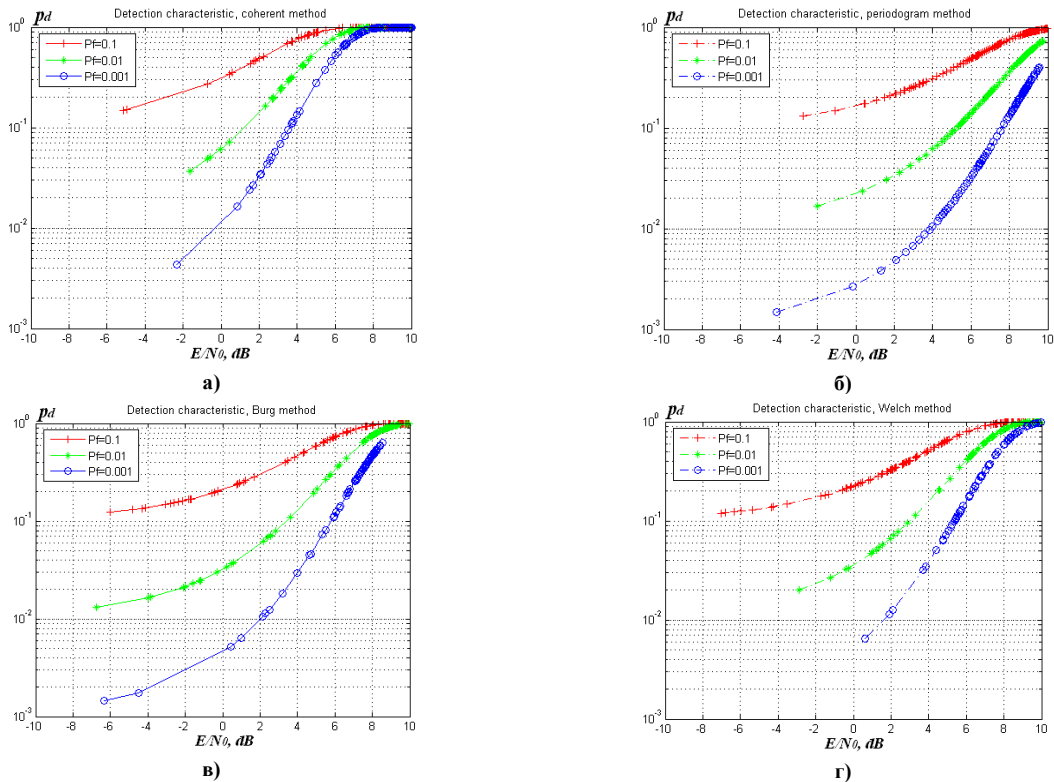


Рис. 5. Характеристики достовірності визначення розладки РКС (тестовий РКС №2) обчислені за тестовими статистиками отриманими: а) синфазним методом, б) методом періодограм, в) методом Берга, г) методом Уелча

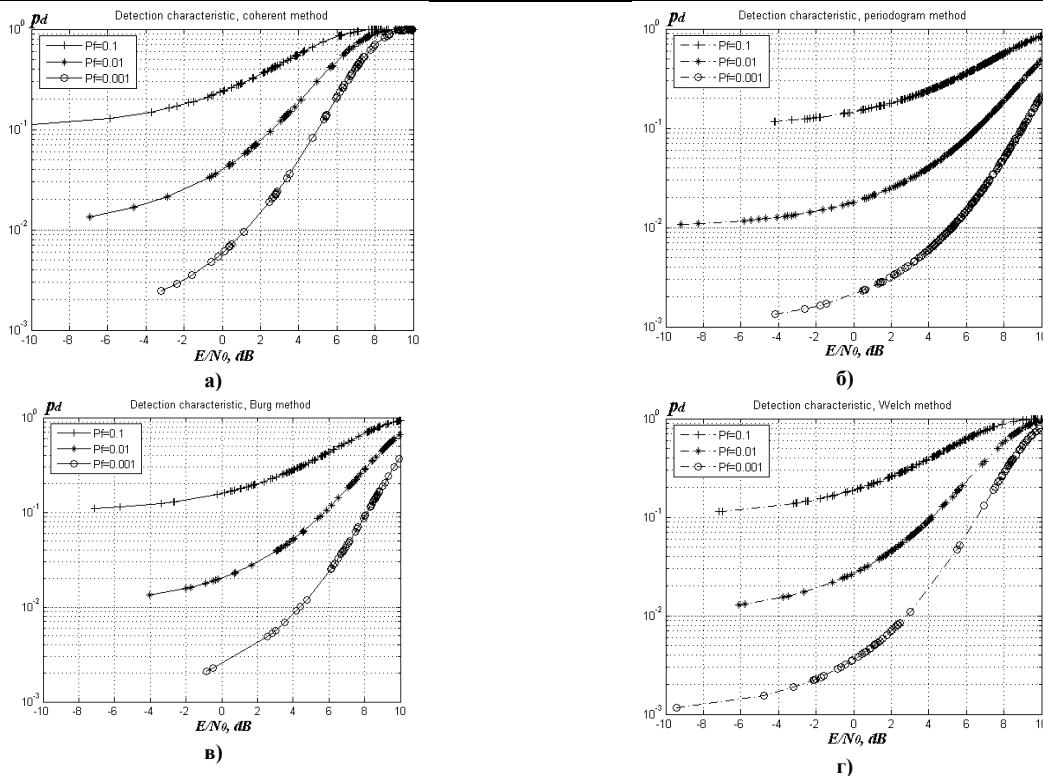


Рис. 6. Характеристики достовірності визначення розладки РКС (тестовий РКС №3) обчислені за тестовими статистиками отриманими: а) синфазним методом, б) методом періодограм, в) методом Берга, г) методом Уелча

Тестування методів визначення розладки РКС на тестовому РКС №3, показує, що характеристики достовірності визначення розладки (рис.6), відрізняються від ідеальних, що викликано невідомістю параметрів та втратами енергії при розмиванні та просочуванні. Серед апробованих методів (синфазний, періодограм, Берга та Уелча) кращим виявився синфазний метод спектрального аналізу, характеристики якого є найближчими до ідеальних. Причому достовірність визначення розладки РКС  $p_d$  при застосуванні синфазного методу є вищою в порівнянні з методами періодограм в 2 рази, Берга в 1,8 рази та Уелча в 1,4 рази, при імовірності помилкового визначення розладки 0,1 та відношенні  $E/N_0 = 4$  дБ енергії нестационарного до спектральної густини потужності стаціонарного РКС.

Загалом встановлено, що характеристики достовірності визначення розладки РКС, за результатом аналізу тестових РКС синфазним методом спектрального аналізу кращі за такі ж характеристики отримані із застосуванням методів періодограм, Уелча та Берга. Достовірність визначення розладки РКС при застосуванні синфазного методу є вищою в порівнянні з методами періодограм в 2–2,7 рази, Берга в 1,7–1,8 рази та Уелча в 1,4–1,6 рази, при імовірності помилкового визначення розладки 0,1 та відношенні 4 дБ енергії нестационарного до спектральної густини потужності стаціонарного РКС.

**Висновки.** За отриманими характеристиками достовірності методів визначення розладки РКС порівняно їх ефективність. Зокрема встановлено, що достовірність визначення розладки РКС при застосуванні синфазного методу є вищою в 1,4–2,7 рази у порівнянні з методами періодограм, Берга та Уелча. Подальше тестування розроблених методів визначення розладки РКС потребує оцінки точності визначення розладки РКС для кожного з них.

### Література

1. Баевский Р.М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем / Р.М. Баевский // Вестник аритмологии. – 2001. – № 24. – С. 65–87.
2. Жиглявский А.А. Обнаружение разладки случайных процессов в задачах радиотехники / А.А. Жиглявский, А.Е. Красковский. – Л. : Издательство Ленинградского университета, 1988. – 224 с.
3. Яворський Б.І. Метод визначення точки розладки ритмокардіосигналу / Б.І. Яворський, Ю.З. Лещинин // Комп'ютерні науки та інформаційні технології // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – № 694. – Львів : Національний університет "Львівська політехніка", 2011. – С. 107–113.
4. 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.
5. Шахтарин Б.И. Обнаружение сигналов: [учеб. пособие] / Б.И. Шахтарин. – М. : Гелиос АРВ, 2006. – 488 с.
6. 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.

7. Аронов Д.М. Функциональные пробы в кардиологии / Д.М. Аронов, В.П. Лупанов. – М. : МЕДпресс-информ, 2003. – 296 с.

8. Лецишин Ю.З. Виявлення періодично корельованої варіабельності серцевого ритму за критерієм Неймана-Пірсона : [зб. наук. пр.] / Ю.З. Лецишин // Комп'ютерні технології друкарства. – Львів : Українська академія друкарства, 2007. – № 18. – С. 204–211.

#### References

1. Baevskij R.M. Analiz variabel'nosti serdechnogo ritma pri ispol'zovanii razlichnyh jelektrokardiograficheskikh sistem / Baevskij R.M. [i dr.] // Vestnik aritmologii– 2001.–№24.– С.65-87.

2. Zhigljavskij A.A. Obnaruzhenie razladki sluchajnyh processov v zadachah radiotekhniki / A.A. Zhigljavskij, A.E. Kraskovskij.– L.: Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, 1988.–224s.

3. Yavorskyi B.I. Metod vyznachennia tochky rozladky rytmokardiosyhnalu / B.I. Yavorskyi, Yu.Z. Leshchysyn // Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnologii / Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika". – №694. – Lviv: Natsionalnyi universytet "Lvivska politehnika", 2011. – S.107-113.

4. 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.

5. Shahtarin B.I. Obnaruzhenie signalov: ucheb. posobie / B.I. Shahtarin. – М.: Gelios ARV, 2006. – 488 s.: il.

6. 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.

7. Aronov D.M. Funkcional'nye proby v kardiologii / D.M. Aronov, V.P. Lupanov.– М.: MEDpress-inform, 2003.– 296 s.

8. Leshchysyn Yu.Z. Vyiavlennia periodychno koreliovanoi variabelnosti sertsevoho rytmu za kryteriiem Neimana-Pirsona / Yu.Z. Leshchysyn // Kompiuterni tekhnologii druzkarstva. Zb. nauk. pr. № 18. – Lviv: Ukrainska akademiia druzkarstva, 2007. – S. 204-211.

Рецензія/Peer review : 26.4.2013 р.

Надрукована/Printed :6.2.2014 р.

Рецензент: завідувач кафедри комп'ютерних наук

Тернопільського національного економічного університету д.т.н., проф. Дивак М.П.