

МОДИФІКАЦІЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МОРФОЛОГІЧНИХ ТА РИТМІЧНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК ЗА ЕЛЕКТРОКАРДІОСИГНАЛАМИ

У даній роботі розглядається модернізований програмний комплекс для автоматизованого визначення морфологічних та ритмічних діагностичних ознак електрокардіосигналу. Обґрунтовано математичне забезпечення програмного комплексу для підвищення швидкості опрацювання електрокардіосигналу у порівнянні з раніше відомими методами. Розроблено структурно-функціональну схему модернізованого програмного комплексу. Розроблено програму, яка реалізує новий метод зведення дискретного випадкового процесу до ізоморфної йому випадкової періодичної послідовності, що дозволить досягти пришвидшення опрацювання електрокардіосигналів в комп'ютерних кардіодіагностичних системах. Проведено апробацію модернізованого програмного комплексу на реальних електрокардіосигналах. Представлено приклад інтерфейсу програми для статистичної обробки електрокардіосигналу, результати опрацювання декількох циклів досліджуваного електрокардіосигналу та його ритмічної структури, графіки декількох циклів реалізації L-періодичної випадкової послідовності, яка отримана із електрокардіограми, шляхом дії на неї оператором перетворення шкали, оцінки функції ритму, графіки реалізації третьої компоненти векторного ритмокардіосигналу, що описує тривалості T-інтервалів в електрокардіосигналі та його гістограми, графіки реалізації статистичної оцінки автокореляційної функції третьої компоненти вектора статистичної оцінки взаємкореляційної функції, графік реалізації статистичних оцінок спектральних щільностей потужності. За рахунок використання нової математичної моделі сигналів серця у вигляді умовного дискретного циклічного випадкового процесу та нового методу його статистичного опрацювання вдалося підвищити швидкість опрацювання електрокардіосигналу у порівнянні із раніше розробленими методами, що ґрунтувалися на його моделі у вигляді циклічного випадкового процесу. Модернізований програмний комплекс дає змогу проводити високоінформативний автоматизований аналіз серцевого ритму та морфологічний аналіз електрокардіосигналів на базі стохастичного підходу.

Ключові слова: програмний комплекс, електрокардіосигнал, аналіз серцевого ритму, морфологічний аналіз кардіосигналів.

S. A. LUPENKO, IA. V. LYTVYNYENKO, H. M. OSUKHIVSKA, N. B. STADNYK

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

A. S. SVERSTIUK

I. Horbachevsky Ternopil National Medical University, Ukraine

MODIFICATION OF THE PROGRAMMING COMPLEX FOR AUTOMATED DETERMINATION OF MORPHOLOGICAL AND RHYTHMIC DIAGNOSTIC SIGNS BY ELECTROCARDIOSIGNALS

In this paper we consider a modernized programming complex for automated determination of morphological and rhythmic diagnostic signs of electrocardio signal. The mathematical software of the programming complex for increasing the speed of processing of the electrocardio signal in comparison with previously known methods is substantiated. The structural and functional scheme of the modernized programming complex has been developed. A program has been developed that implements a new method of reducing a discrete random process to an isomorphic random periodic sequence, which will allow to accelerate the processing of electrocardiograms in computer cardiac diagnostic systems. The modernized programming complex was tested on real electrocardio signal. An example of the program interface for statistical processing of electrocardio signal, the results of processing several cycles of the studied electrocardio signal and its rhythmic structure, the graph of several cycles of implementation of the L-periodic random sequence obtained from the electrocardiogram, by acting on it by the scale conversion operator, evaluation of rhythm function, graphs of realization of the third component of the vector rhythmocardio signal, describing the duration of T-intervals in the electrocardio signal and its histograms, implementation graphs: statistical evaluation of the autocorrelation function of the third component of the vector of statistical evaluation of the inter-correlation function, graph of realization of statistical evaluation of spectral power densities. Through the use of a new mathematical model of heart signals in the form of a conditional discrete cyclic random process and a new method of statistical processing, it was possible to increase the speed of processing of the electrocardio signal in comparison with previously developed methods based on its model in the form of a cyclic random process. The modernized programming complex enables to carry out highly informative automated heart rhythmic analysis and morphological analysis of electrocardiograms on the basis of stochastic approach.

Key words: programming complex, electrocardio signal, cardiac rhythm analysis, morphological analysis of cardiac signals.

Вступ

Відомими процесами та явищами дійсності є такі, які відображають у часі структуру яка повторюється. Серед таких процесів, сигналів відомими та добре вивченими є електрокардіосигнали. Сучасний стан розвитку інформаційних технологій дозволяє по новому підійти до опрацювання таких сигналів та ефективно розв'язати висунуті завдання сучасної медицині під час побудови діагностичної апаратури, шляхом створення нових ефективних математичних засобів, які дозволяють підвищити достовірність та інформативність опрацювання циклічних сигналів, зокрема електрокардіосигналів [1–6]. Тому, розробка діагностичних програмних комплексів для автоматизованої діагностики стану серця людини за зареєстрованими електрокардіосигналами є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого,

дасть змогу підвищити якість та ефективність діагностування функціонального стану серця та серцево-судинної системи організму людини в цілому.

Нові математичні моделі та методи опрацювання циклічних електрокардіосигналів розроблені та обґрунтовані у працях [7–15]. Використання нових математичних моделей дозволило підвищити точність та достовірність діагностування функціонального стану серця завдяки підвищенню інформативності морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму. Програмний комплекс на основі розробленого математичного забезпечення подано у роботах [16, 17], який призначений для моделювання та проведення морфологічного аналізу, аналізу серцевого ритму електрокардіосигналів. Даний комплекс був модернізований та втілює нові розроблені методи опрацювання електрокардіосигналів.

Аналіз останніх досліджень

Підвищення швидкодії методів статистичного опрацювання електрокардіосигналів поруч із підвищенням інформативності їх автоматизованого аналізу досягається завдяки використанню нової математичної моделі, яка відображає подвійну стохастичність досліджуваних електрокардіосигналів (стохастичність морфологічної та ритмічної структур) та застосуванню нового методу зведення дискретного циклічного випадкового процесу до ізоморфної йому випадкової періодичної послідовності.

Дану роботу присвячено удосконаленню програмного комплексу, де на відміну від попередньої розробки [16, 17], у комплекс включено новий метод, що передбачає опрацювання електрокардіосигналів, шляхом зведення до ізоморфної випадкової періодичної послідовності дискретного циклічного випадкового процесу, як моделі електрокардіосигналу, що дозволило підвищити швидкість його опрацювання у порівнянні з раніше розробленими методами завдяки зниженню обчислювальної складності відомих статистичних методів оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних випадкових процесів дискретного аргументу.

Мета роботи

Мета роботи полягає в модернізації програмного комплексу для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю, за рахунок використання нової математичної моделі сигналів серця, у вигляді умовного дискретного циклічного випадкового процесу та нового методу статистичного опрацювання, а саме методу зведення дискретного циклічного випадкового процесу до ізоморфної йому випадкової періодичної послідовності, що завдяки зменшенню обчислювальної складності методу опрацювання електрокардіосигналів дало змогу пришвидшити їх опрацювання в комп'ютерних кардіодіагностичних системах у порівнянні з раніше розробленими методами.

Результати дослідження

Наведемо основні математичні співвідношення, які лежать в основі математичного забезпечення модифікованого програмного комплексу. При цьому зосередимо увагу на розробленій частині комплексу, яка стосується зведення до ізоморфної випадкової періодичної послідовності дискретного циклічного випадкового процесу як моделі електрокардіосигналу. Програмний комплекс дає змогу проводити автоматизований аналіз електрокардіосигналу, зокрема, його морфологічних та ритмічних ознак.

Математична модель електрокардіосигналу у вигляді дискретних циклічного випадкового процесу та умовного циклічного випадкового процесу

Відомо [10], що дискретний випадковий процес $\{\xi(\omega, t_{ml}), \omega \in \Omega, t_{ml} \in \mathbf{D}\}$ називається циклічним дискретним випадковим процесом, якщо існує така дискретна функція $T(t_{ml}, n)$ (функція ритму), яка задовольняє умовам: 1) $T(t_{ml}, n) > 0$, якщо $n > 0$; 2) $T(t_{ml}, n) = 0$, якщо $n = 0$; 3) $T(t_{ml}, n) < 0$, якщо $n < 0$; 4) для будь-яких $t_{m_1 l_1} \in \mathbf{D}$ та $t_{m_2 l_2} \in \mathbf{D}$, для яких $t_{m_2 l_2} > t_{m_1 l_1}$, для функції $T(t_{ml}, n)$ виконується нерівність $t_{m_1 l_1} + T(t_{m_1 l_1}, n) < t_{m_2 l_2} + T(t_{m_2 l_2}, n), \forall n \in \mathbf{Z}$; що скінченно вимірні вектори $(\xi(\omega, t_{m_1 l_1}), \xi(\omega, t_{m_2 l_2}), \dots, \xi(\omega, t_{m_k l_k}))$ і $(\xi(\omega, t_{m_1 l_1} + T(t_{m_1 l_1}, n)), \xi(\omega, t_{m_2 l_2} + T(t_{m_2 l_2}, n)), \dots, \xi(\omega, t_{m_k l_k} + T(t_{m_k l_k}, n)))$, $n \in \mathbf{Z}$, при всіх цілих $k \geq 1$ є стохастично еквівалентними у широкому розумінні.

Метод зведення статистичного опрацювання (оцінювання, аналізу, прогнозування) циклічного випадкового процесу дискретного аргументу до відповідного статистичного опрацювання ізоморфної йому періодичної випадкової послідовності полягає у послідовному виконанні таких кроків:

1) перетворення ω -реалізації $\xi_{1_\omega}(t_{ml}), \omega \in \Omega, t_{ml} \in \mathbf{D}$ циклічного випадкового процесу $\xi_1(\omega, t_{ml}), \omega \in \Omega, t_{ml} \in \mathbf{D}$ у ω -реалізацію $\xi_{2_\omega}(i), i \in \mathbf{Z}$ ізоморфної йому відносно порядку та значень L -періодичної послідовності $\xi_2(\omega, i), \omega \in \Omega, i \in \mathbf{Z}$, шляхом дії оператора перетворення шкали $\mathbf{G}_{y(t_{ml})}$ із функцією перетворення шкали $y(t_{ml}) = L \cdot (m-1) + l$;

2) застосування відомих методів опрацювання періодичних випадкових послідовностей та отримання їх результатів (статистичних точкових та інтервальних оцінок певних ймовірнісних характеристик);

3) отримання статистичних оцінок ймовірнісних характеристик циклічного випадкового процесу $\xi_1(\omega, t_{ml}), \omega \in \Omega, t_{ml} \in \mathbf{D}$, шляхом застосування оберненого оператора перетворення шкали до попередньо отриманих відповідних статистичних оцінок для L -періодичної випадкової послідовності.

Будемо вважати, що зареєстровано M циклів по L відліків у кожному циклі досліджуваного

циклічного сигналу, математичною моделлю якого є циклічний випадковий процес $\left\{ \xi_1(\omega, t_{ml}), \omega \in \Omega, t_{ml} \in \mathbf{R}, m = \overline{1, M}, l = \overline{1, L} \right\}$ (для спрощення подальших позначень будемо писати $\xi_1(\omega, t_{ml})$).

Відповідно, математичною моделлю реєстрограми циклічного сигналу буде ω -реалізація $\left\{ \xi_{1\omega}(t_{ml}), t_{ml} \in \mathbf{R}, m = \overline{1, M}, l = \overline{1, L} \right\}$ (для спрощення подальших позначень будемо писати $\xi_{1\omega}(t_{ml})$) цього циклічного випадкового процесу дискретного аргументу. Ізоморфна досліджуваному дискретному процесу відносно порядку та значень L -періодична випадкова послідовність $\left\{ \xi_2(\omega, i), \omega \in \Omega, i = \overline{1, M \cdot L} \right\}$ (для спрощення подальших позначень будемо писати $\xi_2(\omega, i)$) отримується, шляхом дії оператора перетворення шкали $\mathbf{G}_{y(t_{ml})}$ із функцією перетворення шкали $y(t_{ml}) = L \cdot (m-1) + l$ на первинний випадковий процес $\xi_1(\omega, t_{ml})$, а саме:

$$\xi_2(\omega, i) = \mathbf{G}_{y(t_{ml})} \{ \xi_1(\omega, t_{ml}) \}, \quad (1)$$

що еквівалентно такій системі рівнянь:

$$\begin{cases} i = y(t_{ml}) = L \cdot (m-1) + l, m = \overline{1, M}, l = \overline{1, L}, \\ \xi_2(\omega, i) = \xi_1(\omega, t_{ml}), i = \overline{1, M \cdot L}, t_{ml} \in \mathbf{R}. \end{cases} \quad (2)$$

Цим же оператором перетворення шкали пов'язані M -циклова ω -реалізація $\xi_{1\omega}(t_{ml})$ циклічного випадкового процесу $\xi_1(\omega, t_{ml})$ та M -циклова ω -реалізація $\left\{ \xi_{2\omega}(i), i = \overline{1, M \cdot L} \right\}$ (для спрощення подальших позначень будемо писати $\xi_{2\omega}(i)$).

Аналітична формула для обчислення значення статистичної оцінки початкової моментної функції першого порядку (математичного сподівання) L -періодичної послідовності $\xi_2(\omega, i)$, що ізоморфна відносно порядку та значень циклічного процесу $\xi_1(\omega, t_{ml})$, має вигляд

$$\hat{m}_{\xi_2}(l) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \xi_{2\omega}(l + L \cdot n), l = \overline{1, L} \quad (3)$$

Аналітична формула для обчислення значення статистичної оцінки центральної моментної функції другого порядку (дисперсії) L -періодичної послідовності $\xi_2(\omega, i)$, що ізоморфна відносно порядку та значень циклічного процесу $\xi_1(\omega, t_{ml})$, має вигляд

$$\hat{d}_{\xi_2}(l) = \frac{1}{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} (\xi_{2\omega}(l + L \cdot n) - \hat{m}_{\xi_2}(l))^2, l = \overline{1, L}. \quad (4)$$

За статистичною процедурою опрацювання електрокардіосигналу слідє нормування отриманих статистичних оцінок та їх розклад у базисі Чебишева, що досліджено у роботі [8, 12].

Розглянемо математичну модель електрокардіосигналів, яка враховує їх подвійну стохастичність, а саме, стохастичність морфологічної структури та стохастичність ритмічної структури електрокардіосигналів. Згідно із роботою [11], умовним циклічним випадковим процесом називають процес $\{ \xi(\omega, \omega', t), \omega \in \Omega, \omega' \in \Omega', t \in \mathbf{R} \}$, який задано на декартовому добутку двох стохастично незалежних ймовірнісних просторів із множинами елементарних подій Ω та Ω' та на множині дійсних чисел \mathbf{R} , і для якого виконуються такі умови:

1) існує така випадкова функція $T(\omega', t, n), \omega' \in \Omega', t \in \mathbf{R}, n \in \mathbf{Z}$, що для кожної ω' , відповідна ω' -реалізація $T_{\omega'}(t, n)$ цієї функції, задовольняє умовам функції ритму;

2) для кожної ω' із Ω' скінченно вимірні вектори $(\xi_{\omega'}(\omega, t_1), \xi_{\omega'}(\omega, t_2), \dots, \xi_{\omega'}(\omega, t_k))$ та $(\xi_{\omega'}(\omega, t_1 + T_{\omega'}(t_1, n)), \xi_{\omega'}(\omega, t_2 + T_{\omega'}(t_2, n)), \dots, \xi_{\omega'}(\omega, t_k + T_{\omega'}(t_k, n))), n \in \mathbf{Z}$, де $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ – множина сепарабельності процесу $\xi_{\omega'}(\omega, t), \omega' \in \Omega', \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}$, при всіх цілих $k \in \mathbf{N}$ є стохастично еквівалентними у широкому розумінні;

3) для будь-яких різних $\omega'_1 \in \Omega'$ та $\omega'_2 \in \Omega'$ випадкові процеси $\xi_{\omega'_1}(\omega, t)$ та $\xi_{\omega'_2}(\omega, t)$ є ізоморфними відносно порядку та значень циклічними випадковими процесами.

Реалізацією (ω' -реалізацією) випадкової функції $T(\omega', t, n)$ є детермінована функція $T_{\omega'}(t, n)$, яка задовольняє умовам функції ритму, а саме:

1) групі умов:

а) $T_{\omega'}(t, n) > 0$, якщо $n > 0$ ($T_{\omega'}(t, 1) < \infty$);

- b) $T_{\omega'}(t, n) = 0$, якщо $n = 0$;
- c) $T_{\omega'}(t, n) < 0$, якщо $n < 0$, $t \in \mathbf{R}$; для будь-яких $t_1 \in \mathbf{R}$ та $t_2 \in \mathbf{R}$, для яких $t_1 < t_2$, для функції $T_{\omega'}(t, n)$ виконується строга нерівність $T_{\omega'}(t_1, n) + t_1 < T_{\omega'}(t_2, n) + t_2$, $\forall n \in \mathbf{Z}$;
- 3) функція $T_{\omega'}(t, n)$ є найменшою за модулем ($|T_{\omega'}(t, n)| \leq |T_{\omega'}^{\gamma}(t, n)|$) серед усіх таких функцій $\{T_{\omega'}^{\gamma}(t, n), \gamma \in \Gamma\}$, які задовольняють вище наведеним умовам 1 та 2.

Математичною моделлю ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, згідно робіт [18–20], є дискретний випадковий процес $\left\{T(\omega', t_{ml}, n), \omega' \in \Omega', t_{ml} \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2, n \in \mathbf{Z}\right\}$, який вкладений у випадкову функцію ритму $T(\omega', t, n)$, $\omega' \in \Omega', t \in \mathbf{R}, n \in \mathbf{Z}$ умовного циклічного випадкового процесу $\{\xi(\omega, \omega', t), \omega \in \Omega, \omega' \in \Omega', t \in \mathbf{R}\}$. Математичною моделлю ритмокардіосигналу (ритмокардіограми), відповідно, є ω' -реалізація $\left\{T_{\omega'}(t_{ml}, n), t_{ml} \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2, n \in \mathbf{Z}\right\}$ дискретного випадкового процесу $\left\{T(\omega', t_{ml}, n), \omega' \in \Omega', t_{ml} \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2, n \in \mathbf{Z}\right\}$. Тобто областю визначення ритмокардіосигналу є дискретна множина дійсних чисел $\mathbf{D} = \left\{t_{ml}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2\right\}$, де індекс m позначає номер циклу електрокардіосигналу, а індекс l – номер відліку електрокардіосигналу в рамках його m -го циклу. Кількість відліків L на цикл електрокардіосигналу визначає роздільну здатність ритмокардіограми, та задає кількість фаз на циклі електрокардіосигналу, які можуть бути виділені методами сегментації та детектування при вирішенні завдання автоматичного формування ритмокардіосигналу із зареєстрованого електрокардіосигналу (електрокардіограми) [18–20].

Першим етапом аналізу серцевого ритму на базі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю є формування вектора випадкових стаціонарних та стаціонарно пов'язаних послідовностей $\Xi_L(\omega', m) = \left\{T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, L}, m = \overline{1, M}\right\}$ [18–20]. Далі проводиться статистичне опрацювання компонент вектору. При цьому оцінюють математичне сподівання, дисперсію, проводять оцінювання виду розподілу (перевірка його на нормальність), шляхом побудови гістограми та застосування критерію згоди χ^2 - Пірсона. Наведемо основні математичні співвідношення для оцінювання ймовірнісних характеристик компонент цього вектора випадкових послідовностей.

Вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки \hat{c}_{1T_l} відповідної l -ї компоненти вектора початкового моменту першого порядку c_{1T_l} (математичного сподівання) стаціонарної випадкової послідовності $T_l(\omega', m)$, а саме:

$$\hat{c}_{1T_l} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M T_{l\omega'}(k), l \in \left\{\overline{1, L}\right\}, \tag{5}$$

де M – кількість циклів зареєстрованої реалізації електрокардіосигналу, $T_{l\omega'}(k)$ – l -а компонента вектора ритмокардіосигналу.

Вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки дисперсії r_{2T_l} стаціонарної випадкової послідовності $T_l(\omega', m)$, а саме:

$$\hat{r}_{2T_l} = \frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M \left(T_{l\omega'}(k) - \hat{c}_{1T_l}\right)^2, l \in \left\{\overline{1, L}\right\}. \tag{6}$$

Відомо, що кореляційні функції стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей є функціями лише від одного цілочисельного аргументу u , який дорівнює $u = m_1 - m_2$, то і їх статистичні оцінки також залежать лише від одного аргументу u . У такому разі автокореляційна функція буде мати вигляд:

$$\hat{r}_{2T_{l_1 T_{l_2}}}(u) = \hat{r}_{2T_{l_1 T_{l_2}}}(m_1 - m_2) = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} \left(T_{l_1\omega'}(k) - \hat{c}_{1T_{l_1}}\right) \cdot \left(T_{l_2\omega'}(k+u) - \hat{c}_{1T_{l_2}}\right),$$

$$u = \overline{0, M_1 - 1}, m_1, m_2 \in \left\{\overline{1, M_1}\right\}, l_1, l_2 \in \left\{\overline{1, L}\right\}, \tag{7}$$

де M_1 – кількість відліків кореляційної функції, глибина кореляції.

Зменшення кількості діагностичних ознак у інформаційних системах аналізу серцевого ритму на

основні векторного ритмокардіосигналу із підвищеною інформативністю досягається використанням спектральних розкладів елементів трикутної матриці $\hat{\mathbf{R}}_T = \left[\hat{r}_{2T_1T_2}(u), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L} \right]$, зокрема, шляхом використання дискретного перетворення Фур'є оцінок автокореляційних та взаємкореляційних функцій із цієї матриці. А саме, замість трикутної матриці $\hat{\mathbf{R}}_T = \left[\hat{r}_{2T_1T_2}(u), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L} \right]$ кореляційних функцій можна використовувати трикутну матрицю $\hat{\mathbf{S}}_T = \left[\hat{S}_{2T_1T_2}(v), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L} \right]$, елементи якої є Фур'є-образами відповідних оцінок кореляційних функцій із матриці $\hat{\mathbf{R}}_T$. А саме, Фур'є-образи із матриці $\hat{\mathbf{S}}_T$ обчислюються так:

$$\hat{S}_{2T_1T_2}(v) = \sum_{u=0}^{M_1-1} \hat{r}_{2T_1T_2}(u) \cdot e^{-j2\pi uv / M_1}, v = \overline{0, M_1-1}, l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{1, L}, j = \sqrt{-1}. \quad (8)$$

Виходячи із нерівності Бесселя, як діагностичні ознаки будемо обирати не всю множину $\left\{ \hat{S}_{2T_1T_2}(v), v = \overline{0, M_1-1} \right\}$ відліків функцій $\hat{S}_{2T_1T_2}(v)$, а лише певну підмножину їх перших M_2 ($M_2 \ll M_1$) відліків $\left\{ \hat{S}_{2T_1T_2}(v), v = \overline{0, M_2-1} \right\}$, які вносять вклад у повну енергію оцінки $\hat{r}_{2T_1T_2}(u)$ кореляційної функції не менше 95%.

Структурно-функціональна схема модифікованого програмного комплексу представлена на рис. 1. Комплекс програм реалізовано мовою програмування Object Pascal.

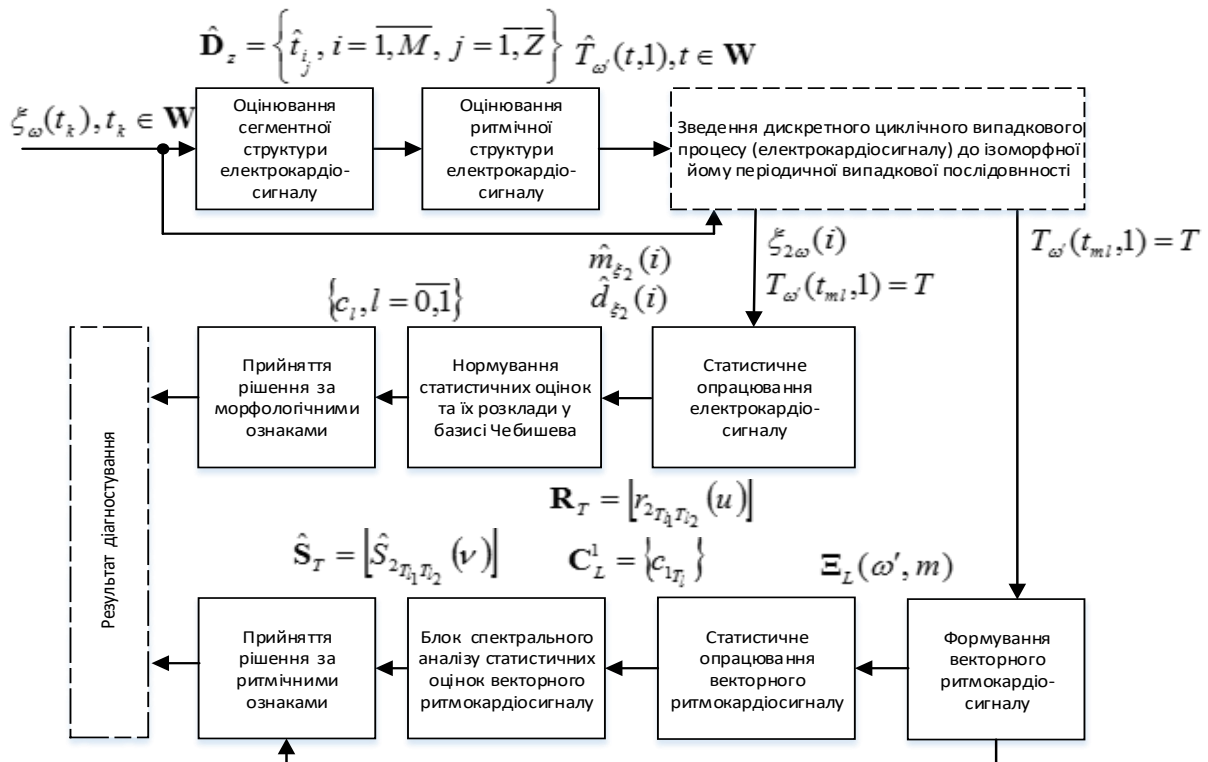


Рис. 1. Структурно-функціональна схема програмного комплексу для аналізу морфологічних та ритмічних діагностичних ознак електрокардіосигналу

Процедура опрацювання досліджуваного електрокардіосигналу включає оцінювання сегментної структури за допомогою методів сегментації, наприклад [21]. Оцінювання функції ритму здійснюємо шляхом інтерполяції ритмічної структури (дискретної функції ритму) [22].

Після оцінювання ритмічної структури та процедури зведення до періодичної випадкової послідовності дискретного циклічного випадкового процесу опрацювання розгалужується на два паралельних етапи. Перший етап здійснює морфологічний аналіз, який згідно даної структури, передбачає статистичне опрацювання електрокардіосигналу, нормування статистичних оцінок та їх розклад у базисі Чебишова і прийняття рішення за отриманими морфологічними ознаками. Другий етап здійснює аналіз ритму і полягає у формуванні векторного ритмокардіосигналу, статистичної обробки вектора та

спектрального аналізу отриманих статистичних оцінок [18–20].

Як приклад, на рисунку 2 наданий загальний вигляд інтерфейсу програми для статистичної обробки електрокардіосигналу, що передбачає методу зведення циклічного випадкового процесу дискретного аргументу до ізоморфної йому випадкової періодичної послідовності.

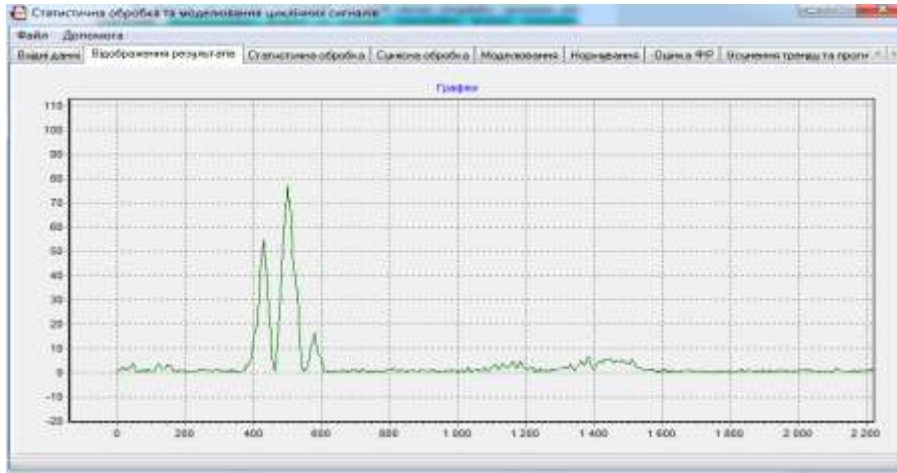


Рис. 2. Приклад інтерфейсу програми для статистичної обробки електрокардіосигналу

На рисунках 3–8 наведені графіки для пояснення етапів роботи програмного комплексу при опрацюванні електрокардіосигналу.

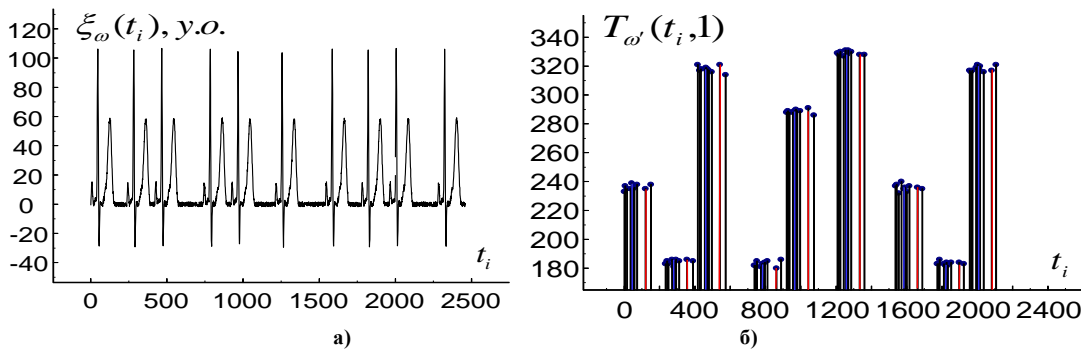


Рис. 3. Результати опрацювання: а) декілька циклів досліджуваного електрокардіосигналу; б) ритмічна структура електрокардіосигналу, червоним кольором виділені відліки які відповідають R-R-інтервалам

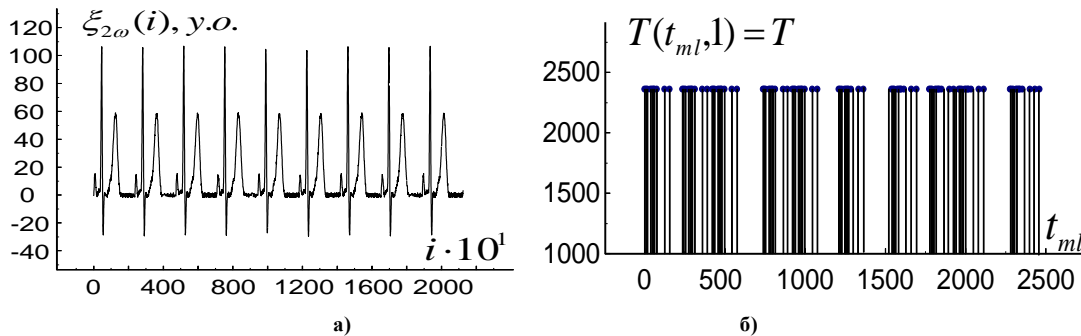


Рис. 4. Графіки: а) декількох циклів реалізації L -періодичної випадкової послідовності, яка отримана із електрокардіограми, шляхом дії на неї оператором перетворення шкали; б) оцінки функції ритму $T(t_{ml}, n)$ (при $n = 1$) L -періодичної випадкової послідовності

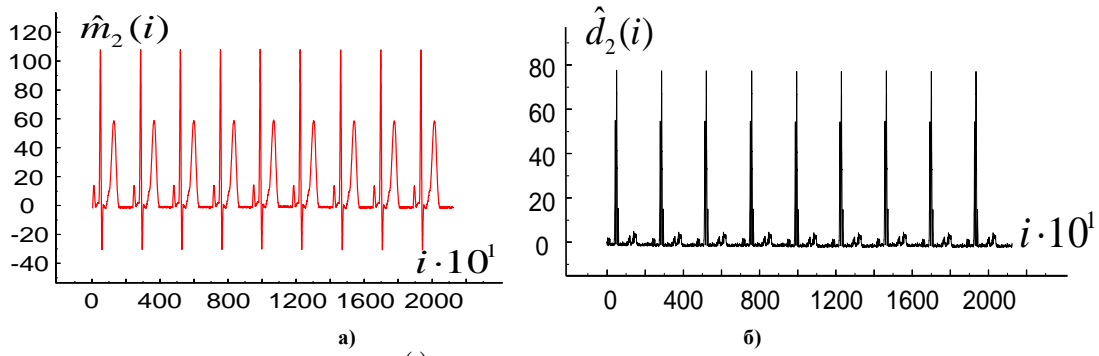


Рис. 5. Графіки: а) декількох циклів оцінки $\hat{m}_{\xi_2}(i)$ початкової моментної функції першого порядку L -періодичної випадкової послідовності $\xi_2(\omega, i)$; б) декількох циклів оцінки $\hat{d}_{\xi_2}(i)$ центральної моментної функції другого порядку L -періодичної випадкової послідовності $\xi_2(\omega, i)$;

Окрема компонента векторного ритмокардіосигналу та результати її статистичного опрацювання наведені на рисунках 6–8.

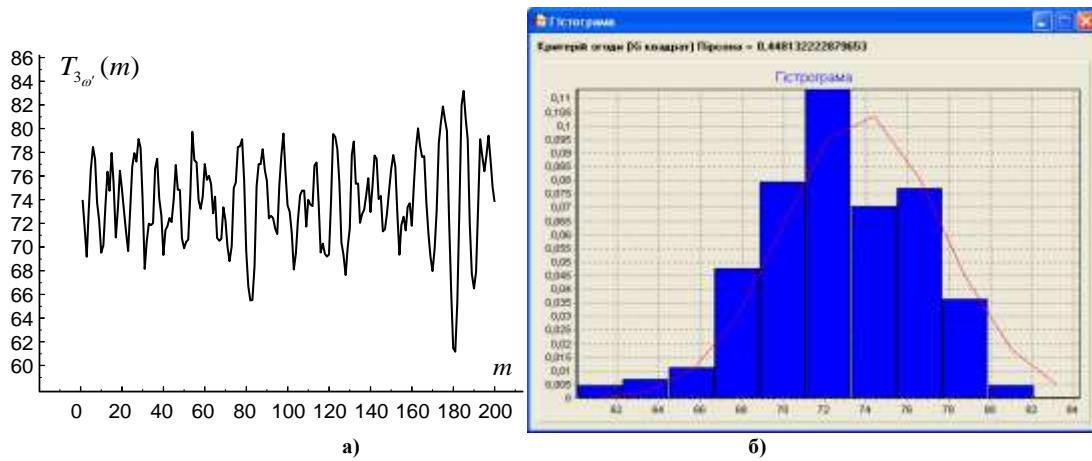


Рис. 6. Графіки: а) реалізації $T_{3\omega'}(m)$ третьої компоненти векторного ритмокардіосигналу $T_3(\omega', m)$, що описує тривалості T -інтервалів в електрокардіосигналі; б) гистограми для третьої компоненти $T_3(\omega', m)$, що описує тривалості T -інтервалів в електрокардіосигналі

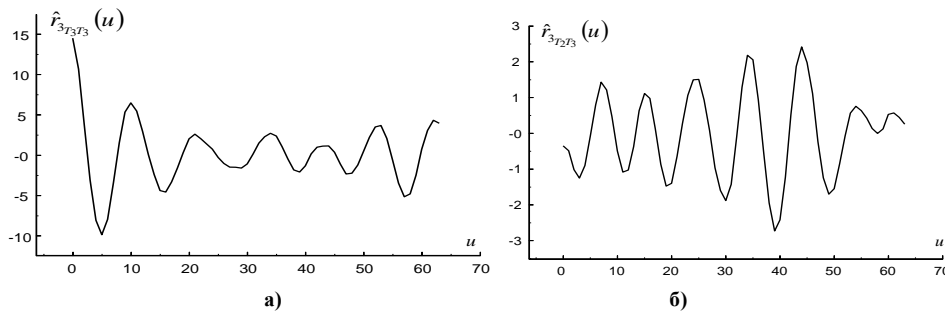


Рис. 7. Графік реалізацій: а) $\hat{r}_{3_{T_3 T_3}}(u)$ статистичної оцінки автокореляційної функції $r_{3_{T_3 T_3}}(u)$ ($l_1 = 3, l_2 = 3$) третьої компоненти вектора $\Xi_3(\omega', m)$; б) $\hat{r}_{3_{T_2 T_3}}(u)$ статистичної оцінки взаємкореляційної функції $r_{3_{T_2 T_3}}(u)$ ($l_1 = 2, l_2 = 3$) другої $T_2(\omega', m)$ та третьої $T_3(\omega', m)$ компоненти вектора $\Xi_3(\omega', m)$

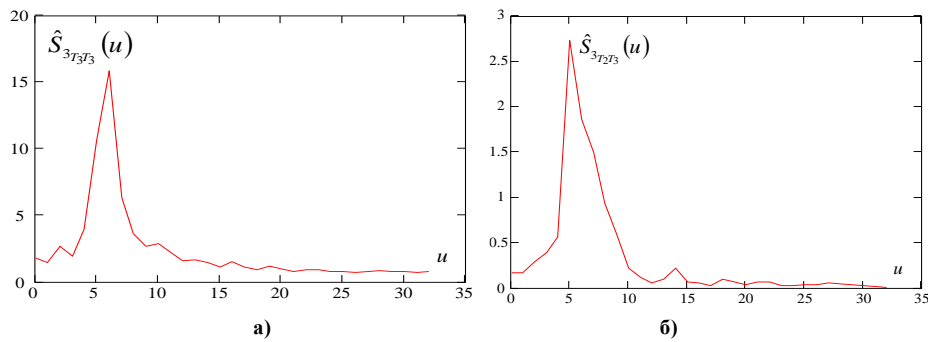


Рис. 8. Графік реалізацій: а) $\hat{S}_{3T_3T_3}(u)$ статистичних оцінок спектральних щільностей потужності $S_{3T_3T_3}(v)$ ($l_1 = 3, l_2 = 3$) третьої компоненти вектора $\Xi_3(\omega', m)$; б) $\hat{S}_{3T_2T_3}(u)$ статистичних оцінок спектральних щільностей потужності $S_{3T_2T_3}(v)$ ($l_1 = 2, l_2 = 3$) другої $T_2(\omega', m)$ та третьої $T_3(\omega', m)$ компоненти вектора $\Xi_3(\omega', m)$

На рис. 3 наведено результати опрацювання декількох циклів досліджуваного електрокардіосигналу із незмінною ритмічною структурою в межах кожного кардіоциклу, а на рис. 4 функція ритму змінюється в кожному із комплексів PQRS. На рис. 5(а) представлена реалізація третьої компоненти векторного ритмокардіосигналу та підтвердження гіпотези про відповідність нормальному закону розподілу відліків кардіосигналів (рис. 5(б)), що уможливило використання статистичних оцінок (математичного сподівання, дисперсії, автокореляційних функцій (рис.7) та спектральних щільностей потужності (рис.8)) для кардіодіагностики.

Висновки

Модернізований програмний комплекс завдяки розширенню його математичного забезпечення, що ґрунтується на новому підході до опрацювання електрокардіосигналів на базі математичної моделі у вигляді умовного циклічного випадкового процесу та методу зведення їх математичної моделі у вигляді дискретного циклічного випадкового процесу до ізоморфної йому випадкової періодичної послідовності, дає змогу проводити статистичний морфологічний аналіз та аналіз ритму кардіосигналів із підвищеною інформативністю, що уможливило підвищення швидкодії їх опрацювання та підвищило точність та достовірність діагностики стану серцево-судинної системи організму людини.

Створений комплекс програм може бути використаний як складова частини спеціалізованого програмного забезпечення в автоматизованих діагностичних системах для комплексного морфоаналізу та аналізу серцевого ритму.

В подальших дослідженнях, на основі результатів робіт [23–25], необхідно розширити функціональні можливості розробленого комплексу програм, використовуючи Web-технології забезпечивши при цьому проведення імітаційного моделювання кардіосигналів із використанням їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу.

Література

1. Chen S.-W., Chen H.-C., Chan H.-L. A real-time QRS detection method based on moving-averaging incorporating with wavelet denoising. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. Elsevier Inc. 2006. Vol. 82. P. 187–195.
2. Chouhan, V., Mehta S., Lingayat N. Delineation of QRS-complex, P and T-wave in 12-lead ECG. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2008. Vol. 8. P. 185–190.
3. Israa Shaker Tawfic, Sema Koc Kayhan. Improving recovery of ECG signal with deterministic guarantees using split signal for multiple supports of matching pursuit (SS-MSMP) algorithm, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2017. Vol. 139. P. 39–50.
4. Christov I. Real time electrocardiogram QRS detection using combined adaptive threshold. *BioMed. Eng. Online*. 2004. Vol. 3(28). P. 9.
5. De Chazazl P., Celler B. Automatic measurement of the QRS onset and offset in individual ECG leads. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 1996. Vol. 4. P. 1399–1403.
6. Sandeep Raj, Kailash Chandra Ray. Sparse representation of ECG signals for automated recognition of cardiac arrhythmias, *Expert Systems with Applications*. 2018. Vol. 105. P. 49–64.
7. Lupenko S., Lutsyk N., Lapusta Yu. Cyclic linear random process as a mathematical model of cyclic signals. *Acta mechanica et automatica*. 2015. Vol. 9. No.4. P. 219–224.
8. Lupenko S. Modeling and signals processing using cyclic random functions / S. Lupenko, O. Orobchuk, N. Stadnik, A. Zozulya // 13th IEEE International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), September 11-14 2018. Lviv, Ukraine. 2018. T. 1. P. 360–363.
9. Lupenko S.A. Theoretical bases of modeling and processing of cyclic signals in information systems. *Scientific monograph*. Lviv: Magnolia Publishing House 2006. 2016. P. 344.
10. Лупенко С., Зозуля А., Сверстюк А., Стадник Н. Математичне моделювання та методи

опрацювання сигналів серця на базі циклічних випадкових процесів та векторів. *Sciences and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, VI(20), ISSUE 172, July 2018. Budapest 2018. P. 47–54.

11. Лупенко С., Сверстюк А., Луцик Н., Стадник Н., Зозуля А. Умовний циклічний випадковий процес як математична модель коливних сигналів та процесів із подвійною стохастичністю. *Поліграфія і видавнича справа. Printing and Publishing*, No.1 (71). 2016. Львів, 2016. С. 147–159.

12. Lytvynenko I., Horkunenko A., Kuchvara O., Palaniza Y. Methods of processing cyclic signals in automated cardiologic complexes. *Proceedings of the 1st International Workshop on Information-Communication Technologies & Embedded Systems, (ICT&ES-2019)*, Mykolaiv, November 13-14, 2019, Ukraine, 2019. P. 116–127.

13. Лупенко С.А., Литвиненко Я.В., Сверстюк А.С. Статистичний сумісний аналіз кардіосигналів на основі вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. *Електроніка та системи управління. Національний авіаційний університет*. 2008. № 4 (18). С. 22–29.

14. Сверстюк А. С. Обґрунтування та верифікація математичної моделі синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2009. № 1. С. 143–147.

15. Martsenyuk V. P., Sverstiuk A. S., Klos-Witkowska A., Horkunenko A. B., Rajba S. Vector of Diagnostic Features in the Form of Decomposition Coefficients of Statistical Estimates Using a Cyclic Random Process Model of Cardiosignals. *The 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, 18-21 September. Metz, 2019. Vol. 1. P. 298–303.

16. Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Сверстюк А.С. Програмний комплекс для обробки та моделювання синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням моделей та методів теорії циклічних функціональних відношень. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2009. № 5. С. 80–87.

17. Луцик Н.С., Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Зозуля А.М. Програмний комплекс для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю. *Журнал Вінницького національного технічного університету «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія»*. Вінниця, 2016. № 1 (35). С. 13–22.

18. Lupenko S., Lutsyk N., Yasniy O., Sobaszek Ł. Statistical analysis of human heart with increased informativeness. *Acta mechanica et automatica*. 2018. Vol. 12, no. 4. P. 311–315.

19. Lupenko S., Lutsyk N., Yasniy O., Sobaszek Ł. Statistical analysis of human heart with increased informativeness. *Acta mechanica et automatica*, Vol. 12. 2018. P. 311–315.

20. Serhii Lupenko, Nadiia Lutsyk, Oleh Yasniy, Andriy Zozulia The Modeling and Diagnostic Features in the Computer Systems of the Heart Rhythm Analysis with the Increased Informativeness. *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. IEEE, 2019. P. 121–124.

21. Lytvynenko I.V. The method of segmentation of stochastic cyclic signals for the problems of their processing and modeling. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2017, Vol. 4, No. 2, P. 93–103.

22. Литвиненко Я.В. Метод інтерполяції кубічним сплайном дискретної функції ритму циклічного сигналу із визначеною сегментною структурою. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький, 2017. № 3. С. 105–112.

23. Марценюк В.П., Семенець А.В., Сверстюк А.С. Концептуальні підходи до інтегрованого середовища проведення наукових медико-біологічних досліджень. *Штучний інтелект*. 2003. № 2. С. 35–44.

24. Марценюк В.П., Кравець Н.О., Сверстюк А.С. Інформаційна система медико-біологічних досліджень: проект на основі Web-технологій. *Український журнал телемедицини та медичної телематики*. 2003. Т. 1, № 1. С. 57–60.

25. Лупенко С.А., Дем'янчук Н.Р., Сверстюк А.С. Концептуально-методологічні основи імітаційного моделювання циклічних сигналів на ЕОМ із використанням їх моделі у вигляді циклічного функціонального відношення. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2008. № 4. С. 101–111.

References

1. Chen S.-W., Chen H.-C., Chan H.-L. A real-time QRS detection method based on moving-averaging incorporating with wavelet denoising. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. Elsevier Inc. 2006. Vol. 82. P. 187–195.
2. Chouhan, V., Mehta S., Lingayat N. Delineation of QRS-complex, P and T-wave in 12-lead ECG. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. 2008. Vol. 8. P. 185–190.
3. Israa Shaker Tawfic, Sema Koc Kayhan. Improving recovery of ECG signal with deterministic guarantees using split signal for multiple supports of matching pursuit (SS-MSMP) algorithm, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2017. Vol. 139. P. 39–50.
4. Christov I. Real time electrocardiogram QRS detection using combined adaptive threshold. *BioMed. Eng. Online*. 2004. Vol. 3(28). P. 9.
5. De Chazazl P., Celler B. Automatic measurement of the QRS onset and offset in individual ECG leads. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 1996. Vol. 4. P. 1399–1403.
6. Sandeep Raj, Kailash Chandra Ray. Sparse representation of ECG signals for automated recognition of cardiac arrhythmias, *Expert Systems with Applications*. 2018. Vol. 105. P. 49–64.
7. Lupenko S., Lutsyk N., Lapusta Yu. Cyclic linear random process as a mathematical model of cyclic signals. *Acta mechanica et automatica*. 2015. Vol. 9. No.4. P. 219–224.
8. Lupenko S. Modeling and signals processing using cyclic random functions / S. Lupenko, O. Orobchuk, N. Stadnik, A. Zozulya //

- 13th IEEE International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), September 11-14 2018. Lviv, Ukraine. 2018. T. 1. P. 360–363.
9. Lupenko S.A. Theoretical bases of modeling and processing of cyclic signals in information systems. Scientific monograph. Lviv: Magnolia Publishing House 2006. 2016. P. 344.
10. Lupenko S., Zozulia A., Sverstiuk A., Stadnyk N. Matematychno modeliuвання ta metody opratsiuvannya syhnali v sertsia na bazi tsyklichnykh vypadkovykh protsesiv ta vektoriv. Sciences and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(20), ISSUE 172, July 2018. Budapest 2018. R. 47–54.
11. Lupenko S., Sverstiuk A., Lutsyk N., Stadnyk N., Zozulia A. Umovnyi tsyklichnyi vypadkovyi protses yak matematychna model kolyvnykh syhnaliv ta protsesiv iz podviinoiu stokhastychnosti. Polihrafiia i vydavnycha sprava. Printing and Publishing, No.1 (71). 2016. Lviv, 2016. S. 147–159.
12. Lytvynenko I., Horkunenko A., Kuchvara O., Palaniza Y. Methods of processing cyclic signals in automated cardiologic complexes. Proceedings of the 1st International Workshop on Information-Communication Technologies & Embedded Systems, (ICT&ES-2019), Mykolaiv, November 13-14, 2019, Ukraine, 2019. P. 116–127.
13. Lupenko S.A., Lytvynenko Ya.V., Sverstiuk A.S. Statystychnyi sumisnyi analiz kardiosyhnaliv na osnovi vektora tsyklichnykh rytmichno poviazanykh vypadkovykh protsesiv. Elektronika ta systemy upravlinnia. Natsionalnyi aviatsiinyi universytet. 2008. № 4 (18). S. 22–29.
14. Sverstiuk A. S. Obhruntuvannya ta verifyfikatsiia matematychnoi modeli synkhronno zareiestrovanykh kardiosyhnaliv z vykorystanniam vektora tsyklichnykh rytmichno poviazanykh vypadkovykh protsesiv. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. 2009. № 1. S. 143–147.
15. Martsenyuk V. P., Sverstiuk A. S., Klos-Witkowska A., Horkunenko A. B., Rajba S. Vector of Diagnostic Features in the Form of Decomposition Coefficients of Statistical Estimates Using a Cyclic Random Process Model of Cardiosignals. The 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 18-21 September. Metz, 2019. Vol. 1. P. 298–303.
16. Lytvynenko Ya.V., Lupenko S.A., Sverstiuk A.S. Prohramnyi kompleks dlia obrobky ta modeliuвання synkhronno zareiestrovanykh kardiosyhnaliv z vykorystanniam modelei ta metodiv teorii tsyklichnykh funktsionalnykh vidnoshen. Herald of Khmelnytskyi National University. 2009. № 5. S. 80–87.
17. Lutsyk N.S., Lytvynenko Ya.V., Lupenko S.A., Zozulia A.M. Prohramnyi kompleks dlia morfolohichnoho analizu ta analizu sertsevoho rytmu z pidvyshchenoiu informatyvniosti. Zhurnal Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia». Vinnytsia, 2016. № 1 (35). S. 13–22.
18. Lupenko S., Lutsyk N., Yasniy O., Sobaszek Ł. Statistical analysis of human heart with increased informativeness. Acta mechanica et automatica. 2018. Vol. 12, no. 4. P. 311–315.
19. Lupenko S., Lutsyk N., Yasniy O., Sobaszek Ł. Statistical analysis of human heart with increased informativeness. Acta mechanica et automatica, Vol. 12. 2018, P. 311–315.
20. Serhii Lupenko, Nadiia Lutsyk, Oleh Yasniy, Andriy Zozulia The Modeling and Diagnostic Features in the Computer Systems of the Heart Rhythm Analysis with the Increased Informativeness. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). IEEE, 2019. R. 121–124.
21. Lytvynenko I.V. The method of segmentation of stochastic cyclic signals for the problems of their processing and modeling. Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing. 2017, Vol. 4, No. 2, R. 93–103.
22. Lytvynenko Ya.V. Metod interpolatsii kubichnym splainom dyskretnoi funktsii rytmu tsyklichnoho syhnalu iz vyznachenoiu sehmentnoiu strukturoiu. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. Khmelnytskyi, 2017. № 3. S. 105–112.
23. Martseniuk V.P., Semenets A.V., Sverstiuk A.S. Kontseptualni pidkhody do intehrovanoho seredovyscha provedennia naukovykh medyko-biolohichnykh doslidzhen. Shtuchnyi intelekt. 2003. № 2. S. 35–44.
24. Martseniuk V.P., Kravets N.O., Sverstiuk A.S. Informatsiina sistema medyko-biolohichnykh doslidzhen: proekt na osnovi Web-tekhnolohii. Ukrainskyi zhurnal teledytsyny ta medychnoi telematyky. 2003. T. 1, № 1. S. 57–60.
25. Lupenko S.A., Demianchuk N.R., Sverstiuk A.S. Kontseptualno-metodolohichni osnovy imitatsiinoho modeliuвання tsyklichnykh syhnaliv na EOM iz vykorystanniam yikh modelei u vyhladi tsyklichnoho funktsionalnoho vidnoshennia. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. 2008. № 4. S. 101–111.

Рецензія/Peer review : 5.2.2020 р. Надрукована/Printed : 15.4.2020 р.
Стаття рецензована редакційною колегією