Математичне моделювання та методи опрацювання сигналів серця на базі циклічних випадкових процесів та векторів

С. А. Лупенко, А. С. Сверстюк, Н. Б. Стадник, А. М. Зозуля

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Тернопільський державний медичний університет ім. І. Я. Горбачевського

Paper received 02.03.18; Accepted for publication 12.03.18.

https://doi.org/10.31174/SEND-NT2018-172VI20-12

Анотація. У роботі розглянуто підхід до моделювання сигналів серця електричної, магнітної та акустичної (механічної) природи на основі моделей теорії циклічних випадкових функцій, а саме, з використанням циклічного випадкового процесу та вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів. Наведено структури статистичних оцінок ймовірнісних характеристик досліджуваних сигналів серця, а також результати їх спектрального аналізу. Обгрунтовано інформативні ознаки в комп'ютерних системах функціональної діагностики стану серця на основі запропонованих у роботі їх математичних моделей та методів.

Ключові слова: *сигнали серця, математичне моделювання, методи опрацювання, циклічні випадкові функції, інформативні ознаки.*

Вступ. Відомо, що функціонування серця супроводжується генеруванням електричних, магнітних та механічних (акустичних) полів, що у своїй просторово-часовій структурі відображають функціональний стан серцево-судинної системи (ССС) людини і дають змогу проводити її діагностику. У кардіометричних діагностичних системах якість, ефективність методів автоматизованого аналізу кардіосигналів на базі ЕОМ зумовлюється адекватністю їх математичних моделей. Математичним моделям та методам опрацювання сигналів серця присвячено значну множину наукових праць [1-4]. У залежності від того, чи враховується стохастичність, існуючі математичні моделі циклічних сигналів серця можна поділити на детерміновані та стохастичні (ймовірнісні, випадкові). До детермінованих слід віднести гармонічні функції (синуси та косинуси), полігармонічні періодичні функції, що розкладаються у ряд Фур'є із кратними гармоніками, майже періодичні детерміновані функції, що зображаються у вигляді ряду Фур'є із некратними гармоніками. Такі математичні моделі циклічних сигналів є досить спрощеними, ідеалізованими моделями реальних сигналів серця і можуть бути використані на практиці лише для опису циклічних кардіосигналів з відносно стабільною, стійкою структурою, коли нехтування випадковістю в ній не приводить до суттєвих спотворень і спрощує розв'язання поставлених задач дослідження. До стохастичних моделей циклічних сигналів належать адитивні, мультиплікативні, адитивно-мультиплікативні суміші стаціонарного випадкового процесу та періодичної детермінованої функції, періодично корельований та маже періодично корельований випадкові процеси, періодично розподілені випадкові процеси та лінійні періодичні випадкові процеси.

Робота присвячена висвітленню задач математичного моделювання та методів опрацювання (статистичного та спектрального аналізу) сигналів серця електричної, магнітної та механічної (акустичної) фізичної природи у рамках їх моделей у вигляді циклічного випадкового процесу та вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів [5-10], які є підкласами класу циклічних випадкових функцій [10]. Такий підхід уможливлює уніфікацію, підвищення ефективності (точності, достовірності та інформативності) математичного забезпечення сучасних комп'ютерних систем функціональної діагностики стану серця та серцево-судинної системи людини.

Основна частина. Згідно з роботою [5], дамо означення циклічного випадкового процесу неперервного аргументу.

Означення 1. Сепарабельний випадковий процес $\xi(\omega,t), \omega\in\mathbf{\Omega}, t\in\mathbf{R}$, називається циклічним випадковим процесом неперервного аргументу, якщо існує така функція $T(t,n)$, яка задовольняє умовам функції ритму, що скінченновимірні вектори $(\xi(\omega,t_1), \xi(\omega,t_2),\dots, \xi(\omega,t_k))$ та $(\xi(\omega,t_1+T(t_1,n)), \xi(\omega,t_2+T(t_2,n))),\dots, \xi(\omega,t_k+T(t_k,n)))$, $n\in\mathbf{Z}$, де $\{t_1, t_2,\dots,t_k\}$ - множина сепарабельності процесу $\xi(\omega,t), \omega\in\mathbf{\Omega}, t\in\mathbf{R}$, при всіх цілих $k\in\mathbf{N}$ є стохастично еквівалентними у широкому розумінні.

Функція ритму $T(t,n)$ визначає закон зміни часових інтервалів між однофазними значеннями циклічної функції. Функція $T(t,n)$ повинна задовольняти таким властивостям:

1. Вона задана на всій дійсній осі $t\in\mathbf{R}$ і на всій множині цілих чисел і дорівнює нулю, коли $n=0$. В інших випадках вона або додатна, або від'ємна, тобто:

a) $T(t,n)>0$, якщо $n>0$;

b) $T(t,n)=0$, якщо $n=0$;

c) $T(t,n)<0$, якщо $n<0$. (1)

2. Для будь-яких $t_1\in\mathbf{R}$ та $t_2\in\mathbf{R}$, для яких $t_2>t_1$, для функції $T(t,n)$ виконується нерівність:

$$t_1+T(t_1,n)<t_2+T(t_2,n), \forall n\in\mathbf{Z}. \quad (2)$$

Функція $T(t,n)$ є найменшою за модулем $(|T(t,n)|\le|T_\gamma(t,n)|)$ серед усіх таких функцій $\{T_\gamma(t,n), \gamma\in\mathbf{\Gamma}\}$, які задовольняють (1) - (2).

Для циклічного випадкового процесу неперервного аргументу характерно те, що сімейство його узгоджених функцій розподілу задовольняє наступним рівностям:

$$F_{k_\xi}(x_1,...,x_k,t_1,...,t_k)=F_{k_\xi}(x_1,...,x_k,y(t_1,n),...,y(t_k,n))=$$
$$=F_{k_\xi}(x_1,...,x_k,t_1+T(t_1,n),...,t_k+T(t_k,n)),x_1,...,x_k,t_1,...,t_k\in\mathbf{R},n\in\mathbf{Z},k\in\mathbf{N}. \quad (3)$$

Якщо $T(t,n)=n\cdot T, T=const, T>0$, то будемо мати випадковий циклічний процес зі стабільним ритмом, який у літературних джерелах відомий як стохастично періодичний процес (циклостаціонарний випадковий процес, періодично розподілений випадковий процес). Якщо $T(t,n)\neq n\cdot T$, то будемо мати випадковий циклічний процес зі змінним ритмом. У роботі [10], дано означення та досліджено властивості циклічних випадкових процесів дискретного аргументу, який може використовуватися як математична модель кардіосигналу після його дискретизації, квантування та оцифровування в сучасних цифрових системах опрацювання сигналів.

З метою опису методів сумісного статистичного аналізу кардіосигналів дамо означення вектора ритмічно пов'язаних циклічних випадкових процесів, які можуть використовуватися як моделі вектора синхронно зареєстрованих кардіосигналів, наприклад, електрокардіосигнали, що зареєстровані в різних відведеннях або синхронно зареєстровані електрокардіосигнал та магнітокардіосигнал [7].

Означення 2. Вектор $\mathbf{\Theta}_N(\omega,t)$ циклічних випадкових процесів $\left\{\xi_i(\omega,t), i=\overline{1,N}, \omega\in\mathbf{\Omega}, t\in\mathbf{R}\right\}$ будемо називати вектором строго ритмічно пов'язаних випадкових процесів, а самі процеси строго ритмічно пов'язаними, якщо існує така функція ритму $T(t,n)$, яка задовольняє умови (1) і (2), що скінченновимірні вектори $\left\{\xi_{i_1}(\omega,t_1),\xi_{i_2}(\omega,t_2),...,\xi_{i_p}(\omega,t_p)\right\}$ та $\left\{\xi_{i_1}(\omega,t_1+T(t_1,n)),\xi_{i_2}(\omega,t_2+T(t_2,n)),...,\xi_{i_p}(\omega,t_p+T(t_p,n))\right\}$ $n\in\mathbf{Z},i_1,...,i_p=\overline{1,N}$, де $\{t_1,...,t_p\}$ - множина сепарабельності вектора $\mathbf{\Theta}_N(\omega,t)$, при всіх цілих $p\geq 1$ є стохастично еквівалентними у широкому розумінні. Якщо вектор $\mathbf{\Theta}_N(\omega,t)$ має лише одну компоненту, то із означення 2 отримується означення 1 циклічного випадкового процесу.

Для сумісної p-вимірної функції розподілу вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів має місце рівність:

$$F_{p_{\xi_{i_1}..\xi_{i_p}}}(x_1,...,x_p;t_1,...,t_p)=$$
$$=F_{p_{\xi_{i_1}..\xi_{i_p}}}(x_1,...,x_p;t_1+T(t_1,n),...,t_p+T(t_p,n)),n\in\mathbf{Z},i_1,...,i_p=\overline{1,N},t_1,...,t_p\in\mathbf{R}. \quad (4)$$

Статистичне оцінювання кардіосигналів. У рамках наведених вище математичних моделей, у роботах [6, 7, 10] розроблено методи статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик циклічних сигналів серця. Наведено тут лише деякі статистичні оцінки для ймовірнісних характеристик кардіосигналу та сукупності синхронно зареєстрованих кардіосигналів. Запишемо формули для обчислення реалізацій відповідних статистичних оцінок імовірнісних характеристик циклічного випадкового процесу у випадку, коли задана деяка довга його реалізація $\xi_\omega(t),t\in\widehat{\mathbf{W}}$, яка містить достатньо велику кількість його повних циклів $\widehat{\mathbf{W}}=\bigcup_{m=1}^{M}\mathbf{W}_{c_m}$.

Так, реалізація статистичної оцінки математичного сподівання кардіосигналу за його реалізацією $\xi_\omega(t),t\in\widehat{\mathbf{W}}$, яка містить достатньо велику кількість його повних циклів дорівнює:

$$\hat{m}_\xi(t)=\frac{1}{M}\sum_{n=0}^{M-1}\xi_\omega(t+T(t,n)),t\in\mathbf{W}_{c_1}=[\tilde{t}_1,\tilde{t}_2], \quad (5)$$

де $t_1\neq 0$ - у загальному випадку.

Реалізація статистичної оцінки дисперсії:

$$\hat{d}_\xi(t)=\frac{1}{M-1}\cdot\sum_{n=0}^{M-1}\left[\xi_\omega(t+T(t,n))-\hat{m}_\xi(t+T(t,n))\right]^2,t\in\mathbf{W}_{c_1}=[\tilde{t}_1,\tilde{t}_2]. \quad (6)$$

Реалізація статистичної оцінки змішаної початкової моментної функції порядку $p=\sum_{i=1}^{k}R_i$:

$$\hat{c}_{p_\xi}(t_1,...,t_k)=$$
$$=\frac{1}{M-M_1+1}\cdot\sum_{n=0}^{M-M_1}\left[\xi_\omega^{R_1}(t_1+T(t_1,n))\cdot...\cdot\xi_\omega^{R_k}(t_k+T(t_k,n))\right],t_1\in\mathbf{W}_{c_1},t_2,...,t_k\in\bigcup_{m=1}^{M_1}\mathbf{W}_{c_m}, \quad (7)$$

де M_1 ($M_1<<M$) - кількість циклів, у рамках яких набирають свої значення аргументи $t_2,...,t_k$.

Наведені вище методи статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик циклічного випадкового процесу є узагальненням методів статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик стохастично періодичних процесів.

Запишемо формули для обчислення реалізацій відповідних статистичних оцінок імовірнісних характеристик вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів, за умови, коли задана деяка довга його реалізація $\xi_\omega(t), t \in \widehat{\mathbf{W}}$, яка містить достатньо велику кількість його повних циклів $\widehat{\mathbf{W}} = \bigcup_{m=1}^{M} \mathbf{W}_{c_m}$. У такому разі, реалізація статистичної оцінки змішаної початкової моментної функції порядку $p = \sum_{j=1}^{k} R_j$:

$$\hat{c}_{p_{\xi_{i_1}\ldots\xi_{i_k}}}(t_1,\ldots,t_k) = \frac{1}{M-M_1+1} \cdot \sum_{n=0}^{M-M_1} \left[\xi_{i_{1_\omega}}^{R_1}\left(t_1 + T(t_1,n)\right) \cdot \ldots \cdot \xi_{i_{k_\omega}}^{R_k}\left(t_k + T(t_k,n)\right) \right],$$
$$t_1 \in \mathbf{W}_{c_1}, t_2,\ldots,t_k \in \bigcup_{m=1}^{M_1} \mathbf{W}_{c_m}, i_1,\ldots,i_k = \overline{1,N}. \quad (8)$$

Реалізація статистичної оцінки змішаної центральної моментної функції порядку $p = \sum_{j=1}^{k} R_j$:

$$\hat{r}_{p_{\xi_{i_1}\ldots\xi_{i_k}}}(t_1,\ldots,t_k) = \frac{1}{M-M_1} \sum_{n=0}^{M-M_1} \left(\xi_{i_{1_\omega}}^{R_1}\left(t_1 + T(t_1,n)\right) - \hat{m}_{\xi_{i_1}}\left(t_1 + T(t_1,n)\right)\right)^{R_1} \cdot \ldots$$
$$\cdot \left(\xi_{i_{k_\omega}}^{R_k}\left(t_k + T(t_k,n)\right) - \hat{m}_{\xi_{i_k}}\left(t_k + T(t_k,n)\right)\right)^{R_k}, t_1 \in \mathbf{W}_{c_1}, t_2,\ldots,t_k \in \bigcup_{m=1}^{M_1} \mathbf{W}_{c_m}, i_1,\ldots,i_k = \overline{1,N}. \quad (9)$$

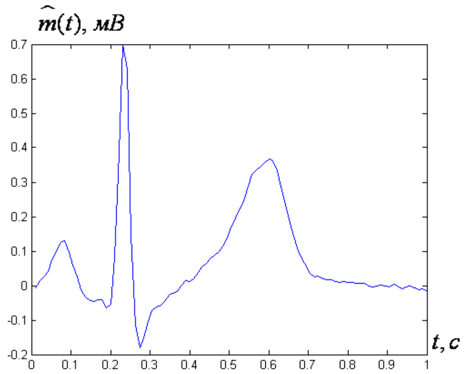
За умови, що функція ритму $T(t,n) = nT, T = const > 0$, будемо мати частинний випадок розроблених статистичних методів, який дає змогу проводити статистичне оцінювання ймовірнісних характеристик стохастично періодичних та періодично пов’язаних випадкових процесів.

Розроблені методи статистичного оцінювання як для випадку одного циклічного випадкового процесу, так і для вектора циклічних ритмічно пов’язаних випадкових процесів, ґрунтуються на припущенні, що є відомою функція ритму $T(t,n)$ циклічного випадкового процесу $\xi(\omega,t)$ чи циклічного випадкового вектора $\mathbf{\Theta}_N(\omega,t)$, хоча в багатьох практичних випадках вона є невідомою і потребує свого попереднього визначення (оцінювання), як це, наприклад, описано в роботі [9].

Результати статистичного та спектрального аналізу сигналів серця та інформативні ознаки для комп’ютерної діагностики функціонального стану серця. У багатьох експериментах по статистичному аналізу широкого класу кардіосигналів, підтверджено факт несуперечності нормальному закону розподілу сукупності синхронно зареєстрованих кардіосигналів, а саме, шляхом застосування χ^2 - тесту, встановлено, що кардіосигнали із довірчою ймовірністю 0,95 (рівень значимості дорівнює 0,05) не суперечать гіпотезі про нормальність їх розподілу. Факт нормальності розподілу кардіосигналів, вказує на достатність використання статистичних оцінок перших двох моментних функцій досліджуваних кардіосигналів, а саме, їх математичних сподівань та кореляційних функцій.

Наведемо приклад статистичного оцінювання ймовірнісних та спектральних характеристик кардіосигналів на основі поданих вище їх моделей та методів опрацювання.

Як приклад, на рис. 1 подано результати статистичного оцінювання математичних сподівань електрокардіосигналу в II відведенні, які відповідають умовній нормі та патології.



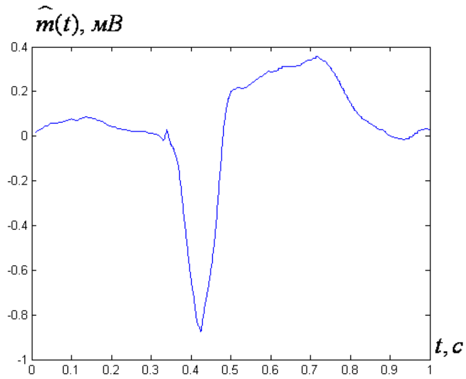
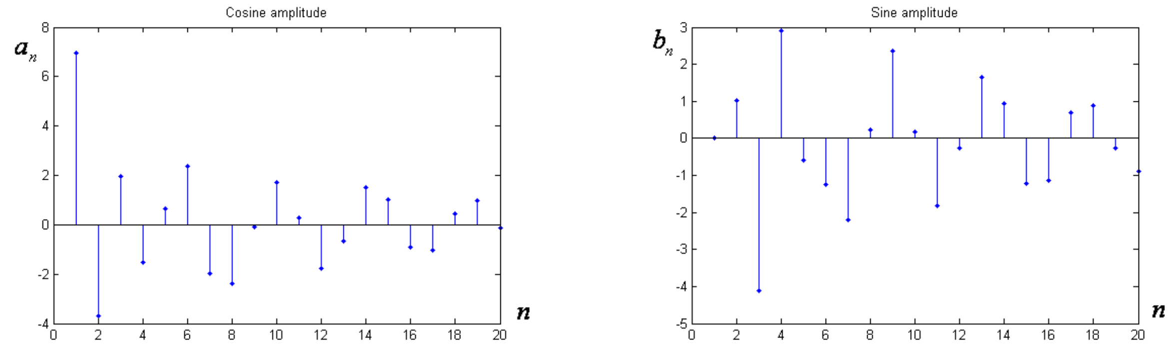


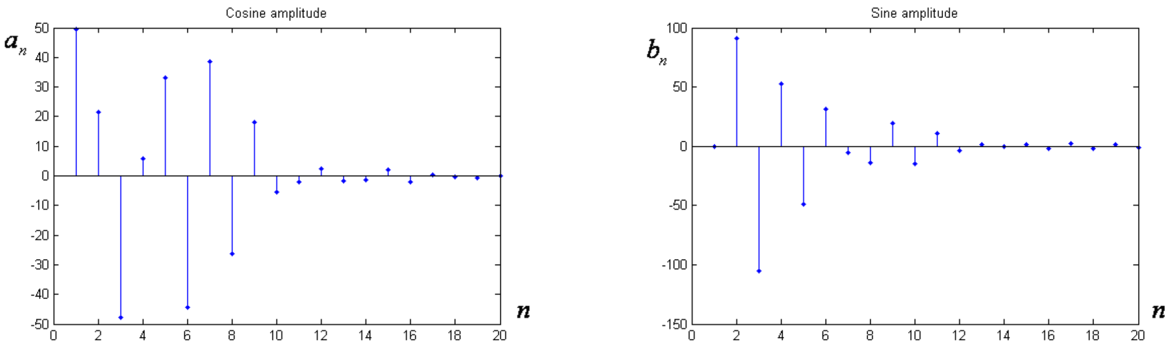
Рис.1. Графіки реалізацій оцінок математичних сподівань електрокардіосигналів в II відведенні: а) діагноз: умовна норма; б) діагноз: нижній інфаркт міокарда

Як приклад, на рис. 2 та 3, подано результати розкладу у ряд Фур’є реалізації оцінок математичних сподівань електрокардіосигналу в II відведенні, які відповідають умовній нормі та патології.



а) б)

Рис.2. Косинусний (а) та синусний (б) спектри реалізації оцінки математичного сподівання електрокардіосигналу в II відведенні (діагноз: умовна норма)



а) б)

Рис.3. Косинусний (а) та синусний (б) спектри реалізації оцінки математичного сподівання електрокардіосигналу в II відведенні (діагноз: нижній інфаркт міокарда)

Як видно із рис. 2 та 3, а також це підтверджується багатьма експериментами, має місце факт значної чутливості оцінки математичного сподівання та коефіцієнтів її розкладу у ряд Фур'є, до зміни стану серцево-судинної системи людини, що вказує на можливість їх використання як діагностичних ознак в автоматизованих системах кардіодіагностики.

З метою зменшення розмірності простору діагностичних ознак, при проведенні сумісного статистичного аналізу синхронно зареєстрованих кардіосигналів, як діагностичні ознаки пропонується використовувати коефіцієнти ортогональних розкладів статистичних оцінок взаємних кореляційних функцій компонент синхронно зареєстрованих кардіосигналів у двовимірний тригонометричний ряд Фур'є. Так, реалізацію статистичної оцінки $\hat{R}_{\xi_1\xi_2}(t_1,t_2), t_1 \in [0,T_1), t_2 \in [0,T_2)$ взаємної кореляційної функції, можна розкласти у двовимірний ряд Фур'є у комплексній формі, а саме:

$$\hat{R}_{\xi_1\xi_2}(t_1,t_2) = \sum_{n_1=-\infty}^{\infty}\sum_{n_2=-\infty}^{\infty} c_{n_1,n_2}\cdot e^{i[\frac{2\pi}{T_1}t_1\cdot n_1+\frac{2\pi}{T_2}t_2\cdot n_2]}, t_1 \in [0,T_1), t_2 \in [0,T_2), \quad (10)$$

де $\left\{e^{i[\frac{2\pi}{T_1}t_1\cdot n_1+\frac{2\pi}{T_2}t_2\cdot n_2]}, n_1,n_2 \in \mathbf{Z}\right\}$ - двовимірний тригонометричний ортогональний базис на області $[0,T_1)\times[0,T_2)$; множина $\{c_{n_1,n_2}, n_1,n_2 \in \mathbf{Z}\}$ є множиною спектральних коефіцієнтів, які визначаються згідно із формулою:

$$c_{n_1,n_2} = \frac{1}{T_1\cdot T_2}\int_0^{T_1}\int_0^{T_2}\hat{R}_{\xi_1\xi_2}(t_1,t_2)\cdot e^{-i[\frac{2\pi}{T_1}t_1\cdot n_1+\frac{2\pi}{T_2}t_2\cdot n_2]}dt_1 dt_2, n_1,n_2 \in \mathbf{Z}. \quad (11)$$

Коефіцієнти $\{c_{n_1,n_2}, n_1,n_2 \in \mathbf{Z}\}$ загалом є комплексними, а саме, мають таке зображення:

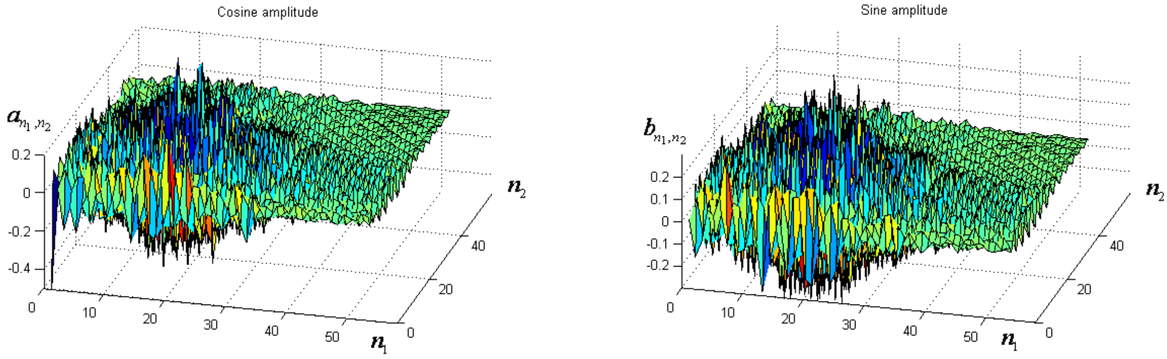
$$c_{n_1,n_2} = a_{n_1,n_2} - i\cdot b_{n_1,n_2}, n_1,n_2 \in \mathbf{Z}, \quad (12)$$

де множини коефіцієнтів $\{a_{n_1,n_2}, n_1,n_2 \in \mathbf{Z}\}$ та $\{b_{n_1,n_2}, n_1,n_2 \in \mathbf{Z}\}$ є відповідно косинусним та синусним спектрами реалізації оцінки взаємної кореляційної функції $\hat{R}_{\xi_1\xi_2}(t_1,t_2)$, які визначаються так:

$$a_{n_1,n_2} = \operatorname{Re}\left\{c_{n_1,n_2}\right\} = \frac{1}{T_1 \cdot T_2} \int_0^{T_1} \int_0^{T_2} \hat{R}_{\xi_1\xi_2}(t_1,t_2) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_1} t_1 \cdot n_1 + \frac{2\pi}{T_2} t_2 \cdot n_2\right) dt_1 dt_2, \; n_1, n_2 \in \mathbf{Z}, \quad (13)$$

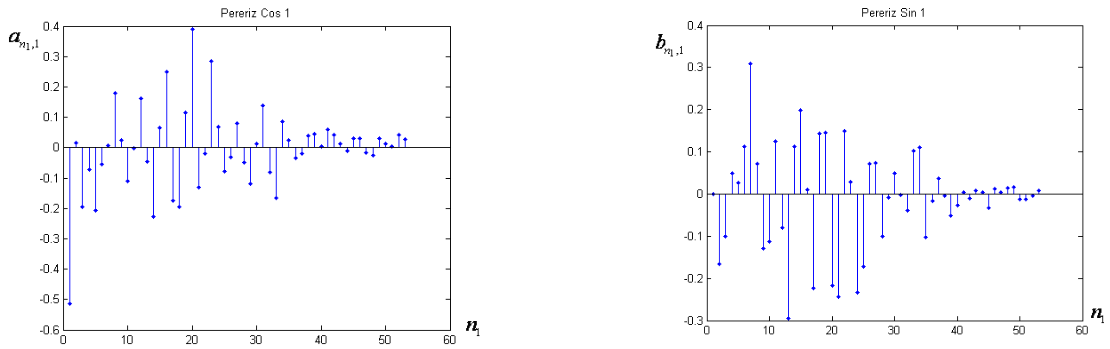
$$b_{n_1,n_2} = \operatorname{Im}\left\{c_{n_1,n_2}\right\} = \frac{1}{T_1 \cdot T_2} \int_0^{T_1} \int_0^{T_2} \hat{R}_{\xi_1\xi_2}(t_1,t_2) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_1} t_1 \cdot n_1 + \frac{2\pi}{T_2} t_2 \cdot n_2\right) dt_1 dt_2, \; n_1, n_2 \in \mathbf{Z}. \quad (14)$$

На рис. 4-12, подано результати таких розкладів реалізації статистичних оцінок взаємних кореляційних функцій компонент синхронно зареєстрованих кардіосигналів, зокрема синхронно зареєстрованих електрокардіосигналів в II та V відведеннях, які відповідають умовній нормі та деяким патологіям.



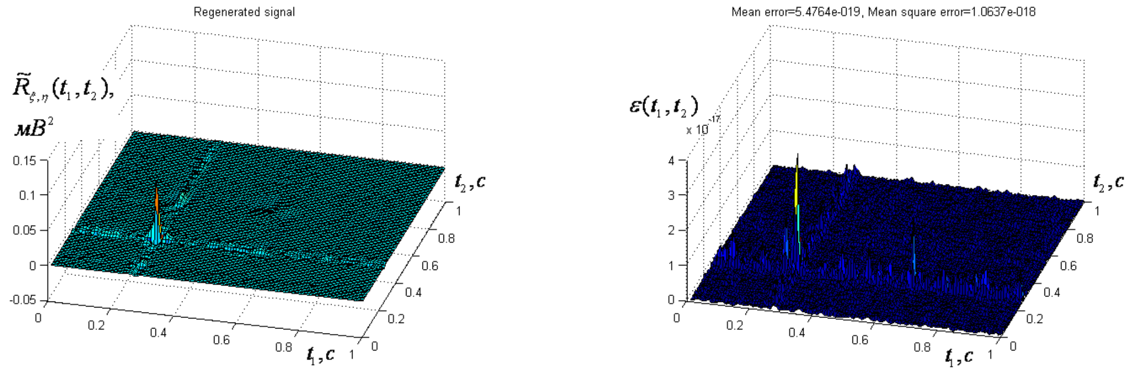
а) *б)*

Рис.4. Косинусний (а) та синусний (б) спектри реалізації оцінки взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів в II та V відведеннях (діагноз: умовна норма)



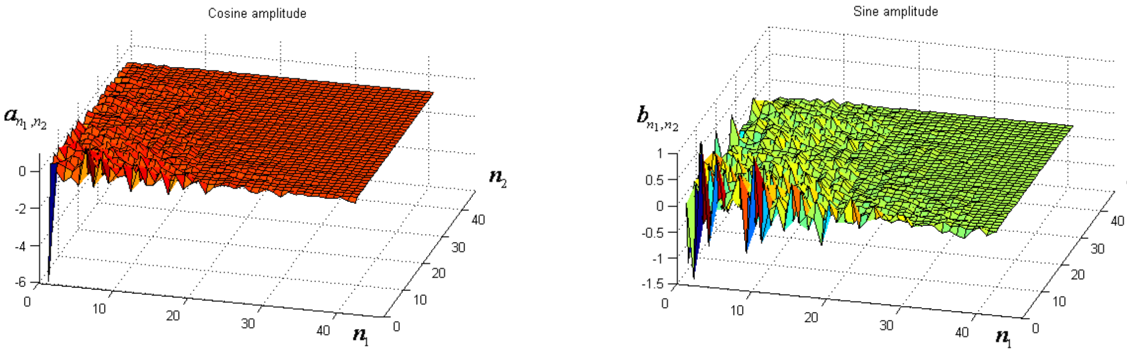
а) *б)*

Рис.5. Перерізи косинусного (а) та синусного (б) спектрів реалізації оцінки взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів в II та V відведеннях (діагноз: умовна норма)



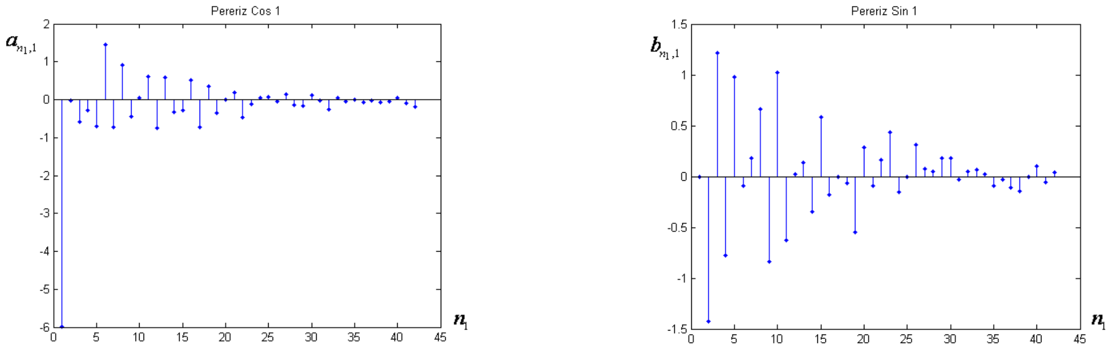
а) *б)*

Рис.6. Апроксимація (а) та похибка апроксимації (б) реалізації оцінки взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів в II та V відведеннях (діагноз: умовна норма)



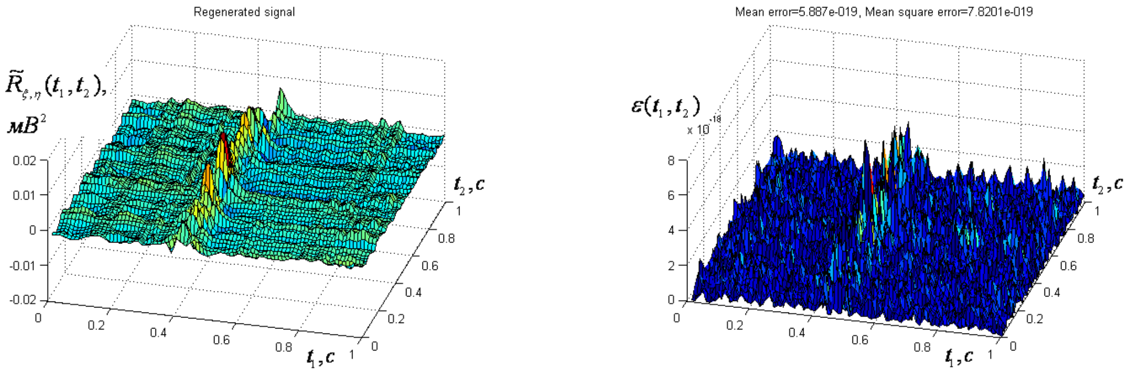
а) *б)*

Рис.7. Косинусний (а) та синусний (б) спектри реалізації оцінки взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів в II та V відведеннях (діагноз: гіпертрофія правого шлуночка та правого передсердя)



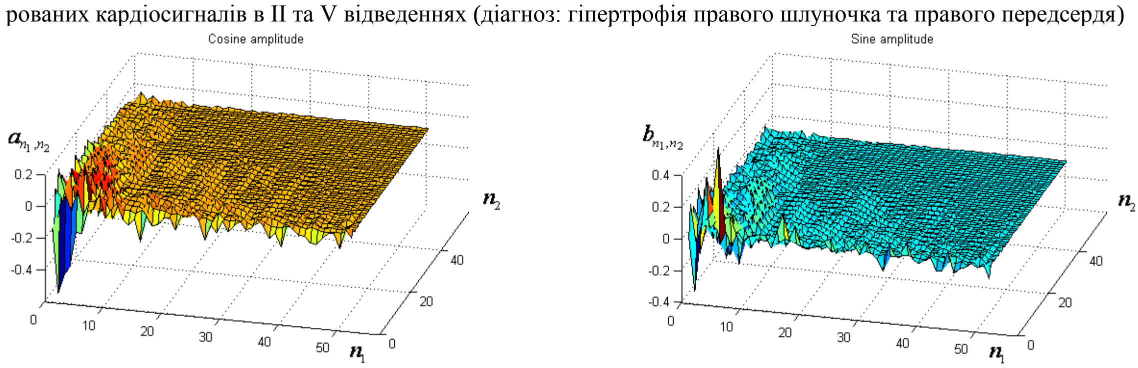
а) *б)*

Рис.8. Перерізи косинусного (а) та синусного (б) спектрів реалізації оцінки взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів в II та V відведеннях (діагноз: гіпертрофія правого шлуночка та правого передсердя)



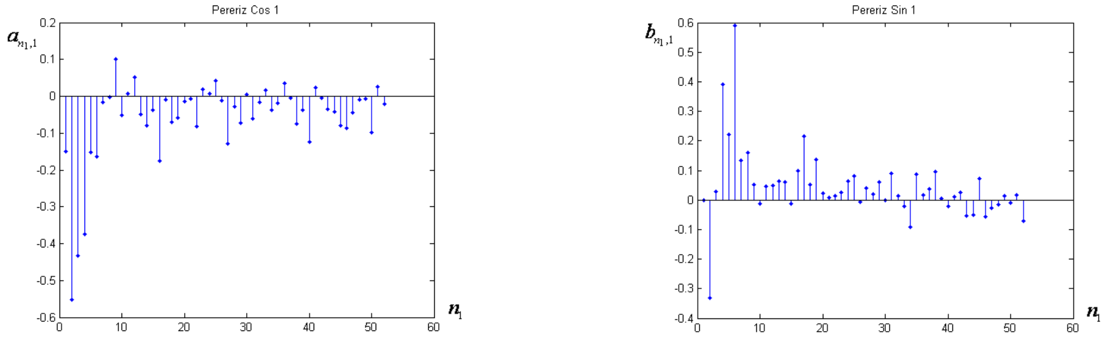
а) *б)*

Рис.9. Апроксимація (а) та похибка апроксимації (б) реалізації оцінки взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів в II та V відведеннях (діагноз: гіпертрофія правого шлуночка та правого передсердя)



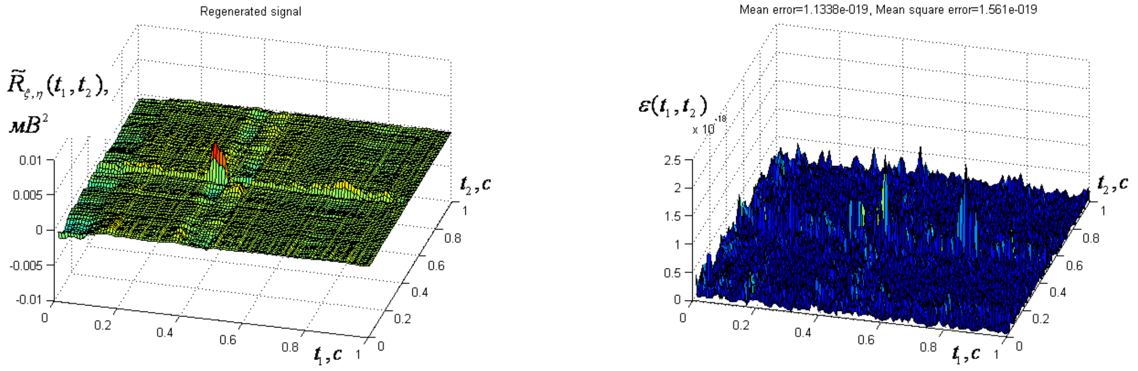
а) *б)*

Рис.10. Косинусний (а) та синусний (б) спектри реалізації оцінки взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів в II та V відведеннях (діагноз: нижній інфаркт міокарда)



а) б)

Рис.11. Перерізи косинусного (а) та синусного (б) спектрів реалізації оцінки взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів в II та V відведеннях (діагноз: нижній інфаркт міокарда)



а) б)

Рис.12. Апроксимація (а) та похибка апроксимації (б) реалізації оцінки взаємної кореляційної функції синхронно зареєстрованих кардіосигналів в II та V відведеннях (діагноз: нижній інфаркт міокарда)

Як видно з рис. 4-12, а також це підтверджується багатьма іншими експериментами, має місце факт значної чутливості оцінки взаємної кореляційної функції та коефіцієнтів її розкладу у двовимірний ряд Фур'є, до зміни стану серцево-судинної системи людини, що вказує на можливість їх використання як діагностичних ознак в автоматизованих системах комплексної кардіодіагностики.

За критерій вибору необхідних спектральних коефіцієнтів розкладу реалізації оцінки математичного сподівання досліджуваного кардіосигналу у ряд Фур'є та реалізації оцінки взаємної кореляційної функції компонент СЗКС у двовимірний ряд Фур'є, вибрано енергетичний критерій, а саме, як діагностичні ознаки використовуються ті спектральні коефіцієнти $\left\{a_n, b_n, n=\overline{1,N}\right\}$ та $\left\{a_{n_1,n_2}, b_{n_1,n_2}, n_1=\overline{1,N_1}, n_2=\overline{1,N_2}\right\}$, які згідно із нерівністю Бесселя, вносять вклад у енергію реалізації статистичної оцінки математичного сподівання кардіосигнлу та у енергію реалізації статистичної оцінки взаємної кореляційної функції компонент синхронно зареєстрованих кардіосигналів не менше ніж 95%.

Висновки. Застосування моделей та методів теорії циклічних випадкових функцій завдяки врахуванню стохастичності, синхронності, циклічності сигналів серця, мінливості часових інтервалів між однофазними значеннями в різних циклах кардіосигналу, а також внаслідок використання однотипних діагностичних ознак для різних класів кардіосигналів, уможливило підвищення точності, достовірності та інформативності автоматизованої діагностики функціонального стану серця. Даний підхід до моделювання та опрацювання кардіосигналів дає змогу будувати узгоджені між собою класи їх стохастичних моделей та відповідних методів аналізу, а саме, моделювати сигнали серця в рамках теорії циклічних випадкових векторів та циклічних випадкових процесів. Застосування векторів циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів дає змогу ефективно здійснювати сумісний аналіз сукупності синхронно зареєстрованих кардіосигналів різної фізичної природи. Застосування циклічних випадкових процесів є слушним для моделювання та аналізу окремих циклічних сигналів серця.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ebmeyer S., Chaikovsky I., Erbel R. et al. Predictive value of the magnetocardiogram for location of regional ischemia of infarction as detected by quantitative analysis of the coronary arteriogram //J. Intern. Congress Series. - 2007. - Vol. 1300. - P. 463-467.
2. Hurst, J. Willis; Fuster, Valentin; O'Rourke, Robert A. (2004). Hurst's The Heart. New York: McGraw-Hill, Medical Publishing Division. pp. 489–90.
3. Malik M. Influence of the recognition artefact in the automatic analysis of long–term electrocardiograms on time–domain measurement of heart rate variability / M. Malik, R. Xia, O.

Odemuyiwa // Med. Biol. Eng. Comput. — 1993. — P. 539–544.
4. Bozhokin, S. V., & Suslova, I. B. (2014). Wavelet Analysis of Non-stationary Signals in Medical Cyber-Physical Systems (MCPS). B S. Balandin, S. Andreev, & Y. Koucheryavy (Eds), Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems (pp 467–480). Springer.
5. Лупенко С., Студена Ю. Математичне моделювання сигналів серця в задачах технічної кардіометрії на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу //Вісник Тернопільського державного технічного університету.- 2006. -Т. 11, №1. -С.134-142.
6. Литвиненко Я., Лупенко С., Студена Ю. Методи статистичної обробки сигналів серця на базі їх моделі у вигляді у вигляді циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою //Вісник Тернопільського державного технічного університету.- 2006. -Т. 11, №4. -С.189-200.
7. 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 №4 (18), 2008. – С.22-29.
8. Литвиненко Я.В. Програмний комплекс для обробки та моделювання синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням моделей та методів теорії циклічних функціональних відношень / Я.В. Литвиненко, С.А. Лупенко, А.С. Сверстюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009.– №5. – С.80-87.
9. Лупенко С.А. Задача інтерполяції функції ритму циклічної функції із відомою зонною структурою \\ Електроніка та системи управління. Національний авіаційний університет 2007.- №2 (12). – С.27-35.
10. Лупенко С.А. Теоретичні основи моделювання та опрацювання циклічних сигналів в інформаційних системах. Наукова монографія /С.А.Лупенко. — Львів: Видавництво «Магнолія 2006», 2016. — 344 с.

REFERENCES

1. Ebmeyer S., Chaikovsky I., Erbel R. et al. Predictive value of the magnetocardiogram for location of regional ischemia of infarction as detected by quantitative analysis of the coronary arteriogram //J. Intern. Congress Series. - 2007. - Vol. 1300. - P. 463-467.
2. Hurst, J. Willis; Fuster, Valentin; O'Rourke, Robert A. (2004). Hurst's The Heart. New York: McGraw-Hill, Medical Publishing Division. pp. 489–90.
3. Malik M. Influence of the recognition artefact in the automatic analysis of long–term electrocardiograms on time–domain measurement of heart rate variability / M. Malik, R. Xia, O. Odemuyiwa // Med. Biol. Eng. Comput. — 1993. — P. 539–544.
4. Bozhokin, S. V., & Suslova, I. B. (2014). Wavelet Analysis of Non-stationary Signals in Medical Cyber-Physical Systems (MCPS). B S. Balandin, S. Andreev, & Y. Koucheryavy (Eds), Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems (pp 467–480). Springer.
5. Lupenko S., Studena Iu. Mathematical modeling of heart signals in the tasks of technical cardiometry on the basis of their model in the form of a cyclic random process // Digest of the Ternopil State Technical University .- 2006. -T. 11, № 1. -P.134-142.
6. Lytvynenko I., Lupenko S., Studena Iu. Methods of statistical processing of heart signals based on their model in the form of a cyclic random process with zone temporal structure // Digest of Ternopil State Technical University .- 2006. -T. 11, No. 4. -P.189-200.
7. Lupenko S.A., Lytvynenko I.V., Sverstiuk A.C. Statistical compatible analysis of cardiac signals based on the vector of cyclic rhythmically related random processes \\ Electronics and control systems. National Aviation University №4 (18), 2008. - p.22-29.
8. Lytvynenko I.V. Software complex for processing and simulation of synchronously registered cardiac signals using models and methods of the theory of cyclic functional relations /I.V. Lytvynenko, S.A. Lupenko, A.S. Sverstiuk // Herald of the Khmelnitskiy National University. - 2009.- №5. - P. 80-87.
9. Lupenko S.A. The problem of interpolation of the function of the rhythm of a cyclic function with known band structure \\ Electronics and control systems. National Aviation University 2007.- №2 (12). - P.27-35.
10. Lupenko S.A. Theoretical bases of modeling and processing of cyclic signals in information systems. Scientific monograph / S.A.Lupenko. - Lviv: Magnolia Publishing House 2006, 2016 - 344 p.

Mathematical modeling and methods for processing heart signals based on cyclic random processes and vectors

S. A. Lupenko, A. S. Sverstiuk, N. B. Stadnyk, A. M. Zozulia

Abstract. The paper considers the unified approach to the modeling and processing of heart signals of electrical, magnetic and acoustic (mechanical) nature based on the model of the theory of cyclic random functions, namely, using cyclic random process and vector of cyclic rhythmically related random processes. The structures of statistical estimations of probabilistic characteristics of the investigated heart signals, as well as the results of their spectral analysis, are presented. The informative signs in computer systems of functional diagnostics of the state of the heart based on the mathematical models and methods proposed in their work are substantiated.

Keywords: *heart signals, mathematical modeling, methods of processing, cyclic random functions, informative features.*

Математическое моделирование и методы обработки сигналов сердца на базе циклических случайных процессов и векторов

С. А. Лупенко, А. С. Сверстюк, Н. Б. Стадник, А. М. Зозуля

Аннотация. В работе рассмотрен подход к моделированию сигналов сердца электрической, магнитной и акустической (механической) природы на основе моделей теории циклических случайных функций, а именно, с использованием циклического случайного процесса и вектора циклических ритмично связанных случайных процессов. Приведены структуры статистических оценок вероятностных характеристик исследуемых сигналов сердца, а также результаты их спектрального анализа. Обоснованно информативные признаки в компьютерных системах функциональной диагностики состояния сердца на основе предложенных в работе их математических моделей и методов.

Ключевые слова: *сигналы сердца, математическое моделирование, методы обработки, циклические случайные функции, информативные признаки.*