

Національна академія наук України
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору

Зозуля Андрій Миколайович

УДК 681.518.3+519.218.82

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА МЕТОДИ СТАТИСТИЧНОГО ОПРАЦЮВАННЯ
РИТМОКАРДІОСИГНАЛІВ ІЗ ПІДВИЩЕНОЮ РОЗДІЛЬНОЮ
ЗДАТНІСТЮ**

01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Лупенко Сергій Анатолійович,
професор кафедри комп'ютерних систем та мереж
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий
співробітник **Юзефович Роман Михайлович**,
завідувач відділу методів та засобів відбору та обробки
діагностичних сигналів Фізико-механічного інституту
ім. Г.В.Карпенка Національної академії наук України

доктор технічних наук, професор
Власюк Анатолій Павлович, завідувач кафедри
економіко-математичного моделювання та
інформаційних технологій Національного університету
“Острозька академія”

Захист відбудеться “18” вересня 2020 року о 13⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.255.01 в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13, аудиторія 601.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України: 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13.

Автореферат розісланий “18” серпня 2020 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук



О. Г. Лебідь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розробка інформаційно-вимірювальних та діагностичних медичних систем, зокрема, у сфері кардіології, без сумніву є важливим напрямом розвитку сучасної науки та технологій, адже серцево-судинні захворювання є одні із найпоширеніших та найнебезпечніших захворювань людини, а застосування сучасних медичних діагностичних та терапевтичних комп'ютеризованих систем суттєво підвищують ефективність та якість надання кардіологічних послуг населенню. Одним із високоінформативних методів дослідження стану серцево-судинної системи, адаптивно-регулятивних можливостей організму пацієнта, а також психологічного стану людини є аналіз серцевого ритму. Особливу ефективність даного кардіологічного методу досягають, шляхом використання сучасних інформаційно-вимірювальних та діагностичних комп'ютеризованих систем, які уможливають автоматизацію оцінювання діагностичних ознак та прийняття медичних рішень про ритм серця людини за зареєстрованими кардіосигналами, переважно, електрокардіосигналами.

Розробкою математичних моделей та методів аналізу серцевого ритму займалися багато науковців, зокрема, Басєвський Р.М., Іванова Г.Г., Меєрсон Ф.З., Саєрс Б., Жемайтіс Д., Драган Я.П., Федорів Р.Ф., Яворський Б.І., Лупенко С.А., Яворська Є.Б., Тиш (Лозінська) Є.В., Луцик Н.С. Переважна більшість детермінованих та стохастичних математичних моделей серцевого ритму ґрунтуються на математичній формалізації, описі ритмокардіосигналу (класичного ритмокардіосигналу), який формується із електрокардіосигналу, шляхом розпізнавання та вимірювання часових тривалостей R-R-інтервалів на електрокардіограмі (реалізації електрокардіосигналу) та формуванні відповідних часових послідовностей. Серед детермінованих математичних моделей класичного ритмокардіосигналу є лінійна та експоненційна функціональні залежності, параметри яких виступають в ролі діагностичних ознак при експрес-аналізі серцевого ритму пацієнта, що перебуває в стані фізичного навантаження. Більшість методів опрацювання класичного ритмокардіосигналу в рамках стохастичного підходу ґрунтуються на чотирьох його ймовірнісних моделях, а саме, аналіз серцевого ритму в стані фізичного спокою пацієнта застосовуються випадкова величина, випадкова стаціонарна послідовність, періодично корельована випадкова послідовність, а у випадку аналізу серцевого ритму при фізичному навантаженні пацієнта застосовується модель у вигляді суми дискретної детермінованої аперіодичної функції та стаціонарної лінійної випадкової послідовності.

Більш інформативним підходом до моделювання та аналізу серцевого ритму є підхід, у якому серцевий ритм репрезентується не класичним ритмокардіосигналом, а ритмокардіосигналом із підвищеною роздільною здатністю, який, на відміну від класичного ритмокардіосигналу, враховує не лише тривалості R-R-інтервалів електрокардіосигналу, але і сукупність інших часових інтервалів між його однофазними значеннями. У рамках детермінованого підходу до аналізу серцевого ритму на базі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю використовується його математична

модель у вигляді детермінованої функції ритму циклічного випадкового процесу, що дає змогу врахувати часові інтервали між однофазними відліками електрокардіосигналу для всіх його фаз, однак не враховує стохастичну природу серцевого ритму. У рамках стохастичного підходу до опису серцевого ритму із підвищеною роздільною здатністю використовується випадкова функція ритму умовного циклічного випадкового процесу, яка є надто абстрактною, щоб на її основі можливо було розробляти конкретні ефективні методи статистичного аналізу ритму серця. Більш конструктивною моделлю до статистичного аналізу ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю є вектор випадкових величини, який враховує стохастичний характер серцевого ритму, однак є статичною математичною моделлю і не дає змогу досліджувати його часову стохастичну динаміку.

Провівши компаративний аналіз існуючих математичних моделей серцевого ритму в рамках детермінованого та стохастичного підходів, а також на базі класичного та векторного ритмокардіосигналів, очевидним є актуальність розробки нової математичної моделі та методів статистичного опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, які, за рахунок відображення його часової стохастичної динаміки та доповнення новими діагностичними ознаками, дають змогу підвищити рівень інформативності аналізу серцевого ритму у комп'ютерних системах функціональної діагностики стану серцево-судинної системи та адаптивно-регулятивних механізмів організму людини в цілому.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження проводилося в рамках наукових тем: ДІ 86-2000 "Розробка основ теорії та засобів вимірювальних полів зображень природних водних середовищ токсичними речовинами, які існуючими методами та засобами не виявляються", де здобувачу належить розробка програмного забезпечення для імітаційного моделювання ритмічних сигналів; РК 0116U000793 «Розробка обчислювальних технологій та методів моделювання для дослідження нестационарних процесів», де здобувачу належить розробка математичної моделі ритму циклічних сигналів; РК 0116U000796 «Розробка та аналіз засобів теоретико-ігрового моделювання стратегій збалансованого технологічного розвитку територій», де здобувачу належить аналіз методів та засобів теоретико-ігрового моделювання.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка нової математичної моделі та методів статистичного опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, які, за рахунок відображення його часової стохастичної динаміки та доповнення новими діагностичними ознаками, дають змогу підвищити рівень інформативності аналізу серцевого ритму у комп'ютерних системах функціональної діагностики стану серцево-судинної системи та адаптивно-регулятивних механізмів організму людини в цілому.

Для досягнення мети необхідно бул з ирішити наступні завдання:

1. Провести порівняльний аналіз та класифікацію відомих математичних моделей та методів аналізу серцевого ритму, а також відповідних діагностичних

ознак в сучасних комп'ютерних системах автоматизованого аналізу серцевого ритму з метою виявлення їх недоліків та постановки завдання дисертаційного дослідження.

2. Розробити та верифікувати математичну модель ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, яка б, у порівнянні із відомими математичними моделями серцевого ритму давала змогу підвищити рівень інформативності автоматизованого аналізу серцевого ритму та була б логічно узгодженою зі стохастичною математичною моделлю електрокардіосигналу.

3. Розробити метод формування ритмокардіограми із підвищеною роздільною здатністю із попередньо зареєстрованої електрокардіограми, з метою повної автоматизації процесу аналізу серцевого ритму в комп'ютерних системах функціональної діагностики стану серця людини.

4. Розробити статистичні методи аналізу ритмокардіосигналів із підвищеною роздільною здатністю, які за рахунок врахування стохастичної часової динаміки серцевого ритму уможливають підвищення рівня інформативності автоматизованого аналізу серцевого ритму у сучасних кардіодіагностичних системах.

5. Обґрунтувати нові діагностичні ознаки у системах автоматизованого аналізу серцевого ритму, які доповнюють відомі діагностичні ознаки за векторним ритмокардіосигналом.

6. Розробити систему комп'ютерних програм для автоматизованого формування та статистичного аналізу серцевого ритму на базі векторного ритмокардіосигналу (ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю) та інтегрувати її в існуючий багатофункціональний програмний комплекс для моделювання та аналізу сигналів різної фізичної природи.

Об'єкт дослідження. Процес моделювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю.

Предмет дослідження. Математична модель та методи опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю.

Методи дослідження. Методи теорії випадкових процесів та векторів для моделювання ритмокардіосигналу із підвищеною здатністю, методи математичної статистики, а саме, методи перевірки статистичних гіпотез та методи статистичного точкового оцінювання для побудови методів опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю та верифікації його математичної моделі. Методи спектрального аналізу стаціонарних випадкових послідовностей для зменшення розмірності діагностичного простору у кардіодіагностичних системах аналізу серцевого ритму.

Наукова новизна отриманих резу. 4 атів.

1. Вперше, розроблено та верифіковано математичну модель ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей, яка, у порівнянні із відомими математичними моделями серцевого ритму, дає змогу підвищити рівень інформативності автоматизованого аналізу серцевого ритму за умови невисокої обчислювальної складності такого аналізу, та є логічно

узгодженою зі стохастичною математичною моделлю електрокардіосигналу у вигляді умовного циклічного випадкового процесу.

2. Вперше, розроблено метод автоматичного формування ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю із попередньо зареєстрованої електрокардіограми, який ґрунтується на статистиці Бродського-Дарховського, що повністю автоматизує процес аналізу серцевого ритму в комп'ютерних системах функціональної діагностики стану серця людини та має вищу точність у порівнянні із аналогічним відомим методом, який ґрунтується на використанні різницевої функції першого порядку.

3. Вперше, розроблено статистичні методи аналізу ритмокардіосигналів із підвищеною роздільною здатністю, які ґрунтуються на їх новій математичній моделі у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей, а саме, побудовано слушні статистичні оцінки вектора математичних сподівань та матриці кореляційних функцій компонент векторного ритмокардіосигналу.

4. Вперше, обґрунтовано матрицю кореляційних функцій та матрицю спектральних щільностей потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю як діагностичні ознаки, які за рахунок відображення стохастичної часової динаміки серцевого ритму доповнюють відомі діагностичні ознаки за векторним ритмокардіосигналом та уможливають підвищення рівня інформативності аналізу серцевого ритму у сучасних кардіодіагностичних системах.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені у дисертації методи автоматичного формування та статистичного аналізу векторного ритмокардіосигналу, а також обґрунтовані нові діагностичні ознаки призначені для клінічного використання з метою проведення автоматизованої високоінформативної діагностики стану серцево-судинної системи та адаптивно-регуляторних можливостей організму людини із використанням сучасних комп'ютеризованих діагностичних систем в сфері кардіології та для проведення дослідницької роботи в науково-експериментальних лабораторіях медичного та фізіологічного напрямів. На основі нової математичної моделі та методів опрацювання векторного ритмокардіосигналу розроблено систему комп'ютерних програм для аналізу серцевого ритму із підвищеною інформативністю, яку впроваджено у ТОВ "Медичний центр «МЕВІЗ»" (акт впровадження від 11.06.2020 р.), а також впроваджено у навчальний процес Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (акт впровадження від 09.06.2020 р.) та в науково-дослідну роботу Тернопільського національного медичного університету імені І.Я. Горбачевського (акт впровадження від 12.06.2020 р.).

5

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати дисертаційної роботи сформульовані та отримані автором самостійно. У наведених працях здобувачеві належать: У наведених працях, опублікованих із співавторами, здобувачеві належать: у [1, 11] – проведення статистичного оцінювання ймовірнісних характеристик електрокардіосигналів; у [2] – проведення статистичного аналізу серцевого ритму із використанням програмного комплексу; у [3] – обґрунтування випадкової функції ритму умовного циклічного

випадкового процесу як моделі серцевого ритму; у [4] – компаративний аналіз моделей циклічних сигналів з точки зору їх використання для задач аналізу серцевого ритму; [5] – розробка методів статистичного опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю; [6] – побудова математичної моделі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю; [7] – розробка блоку програмного комплексу для автоматизованого аналізу серцевого ритму на основі векторного ритмокардіосигналу; [8] – розробка математичних структур на базі умовного циклічного випадкового процесу дискретного аргументу для формалізованого опису серцевого ритму із підвищеною роздільною здатністю; [9] – розробка методу формування векторного ритмокардіосигналу із електрокардіосигналу; [12] – проведення автоматизованого формування ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю та проведення його гістограмного аналізу; [13] – розробка вимог та узагальненої схеми експертної системи для обґрунтованого вибору моделей кардіосигналів; [14] – підхід до відшукування прихованих закономірностей ритміки серця; [16] – обґрунтування серцевого ритму як індикатора ризиків життєдіяльності; [17] – обґрунтування моделі поля електричних потенціалів, які виникають в наслідок електричної активності серця людини, у вигляді лінійного циклічного випадкового просторово-часового поля. З наукових робіт, опублікованих у співавторстві, у дисертаційній роботі використані результати особистих досліджень здобувача.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались на: 13th IEEE International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) (Львів, 2018 р.); 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). (Будейовіце, Чехія 2019 р.); Conference Ceoinformatics (2020); VI międzynarodowa konferencja studentów oraz doktorantów „Inżynier XXI wieku” (Бельсько-Бяла, Польща, 2016); V Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій" (Тернопіль, 2016); п'ятої та шостої наукових конференцій Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 2001 та 2003 роки); на наукових семінарах кафедри комп'ютерних систем та мереж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Публікації. Основні результати, отримані в дисертації, опубліковано в 17 наукових працях, зокрема: 1 стаття у закордонному науковому періодичному виданні [1], 9 статей у наукових фахових періодичних виданнях України [2 - 10], а також 7 публікації у матеріалах наукових конференцій. Із них 3 публікації входять до міжнародної наукометричної бази Scopus [11, 12, 16], а 8 публікацій входять до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus [1-5, 7-9].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 123 найменувань, 4 додатків. Повний обсяг дисертації складає 197 сторінок, основний зміст викладено на 126 сторінках, де наведено 48 рисунків та 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, наведено зв'язок роботи з науково-дослідною темою, сформульовано мету та визначено завдання дослідження, об'єкт та предмет дослідження, наведено перелік методів дослідження, що застосовувались для досягнення мети дисертаційної роботи. Сформульовано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий творчий внесок здобувача. Подано відомості щодо апробації та опублікування результатів дослідження.

У **першому розділі**, ґрунтуючись на проведеному огляді літературних джерел розглянуто відомі детерміновані та стохастичні підходи до моделювання та аналізу серцевого ритму у автоматизованих інформаційних системах на базі класичного ритмокардіосигналу та ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, що дало змогу виявити їх недоліки та сформулювати наукове завдання дисертаційного дослідження.

У **другому розділі**, розроблено математичну модель ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей. Ця модель, у порівнянні із відомими математичними моделями класичного ритмокардіосигналу, дає змогу підвищити рівень інформативності аналізу серцевого ритму, а у порівнянні із вектором випадкових величин як математичною моделлю ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, уможливорює врахування часової динаміки ритму серця.

Електрокардіосигнал формально подано як умовний циклічний випадковий процес $\{\xi(\omega, t_{ml}(\omega')) \in \Theta_\xi, \omega' \in \Omega', \omega \in \Omega, t_{ml}(\omega') \in \mathbf{D}(\omega')\}$ дискретного аргументу, який задано на стохастично незалежних ймовірнісних просторах $(\Omega, \mathbf{F}, \mathbf{P})$, $(\Omega', \mathbf{F}', \mathbf{P}')$ та на випадковій дискретній області визначення

$\mathbf{D}(\omega') = \left\{ t_{ml}(\omega') \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2 \right\}$, та для якого кожна його ω' -реалізація

$\left\{ \xi_{\omega'}(\omega, t_{ml}^{\omega'}) \mid \omega \in \Omega, t_{ml}^{\omega'} \in \mathbf{D}_{\omega'} \right\}$ належить класу

$\Theta_\xi = \left\{ \xi_\lambda(\omega, t_{ml}^\lambda) \mid \omega \in \Omega, t_{ml}^\lambda \in \mathbf{D}_\lambda, \lambda \in \Lambda \right\}$ ізоморфних відносно порядку та значень циклічних випадкових процесів дискретного аргументу. Кожна ω' -реалізація

$\mathbf{D}_{\omega'} = \left\{ t_{ml}^{\omega'} \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2 \right\}$ випадкової області визначення

$\mathbf{D}(\omega') = \left\{ t_{ml}(\omega') \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2 \right\}$ умовного циклічного випадкового

процесу $\xi(\omega, t_{ml}(\omega'))$ є дискретною підмножиною дійсних чисел, елементи якої задовольняють такі умови: $t_{m_1 l_1}^{\omega'} < t_{m_2 l_2}^{\omega'}$, якщо $m_2 < m_1$, або якщо $m_2 = m_1$, а $l_2 < l_1$

, в інших випадках $t_{m_1 l_1}^{\omega'} > t_{m_2 l_2}^{\omega'}$ ($m_2, m_1 \in \mathbf{Z}$, $l_1 = \overline{1, L}$, $0 < t_{m, l+1}^{\omega'} - t_{ml}^{\omega'} < \infty$).

Ритмічна структура умовного циклічного випадкового процесу дискретного аргументу повністю задається випадковою функцією ритму $T(t_{ml}(\omega'), n)$, $\omega' \in \Omega', t_{ml}(\omega') \in \mathbf{R}, n \in \mathbf{Z}$, яка задана на ймовірнісному просторі

(Ω', F', P') , для якої кожна її ω' -реалізація $T_{\omega'}(t_{ml}^{\omega'}, n)$, $t_{ml}^{\omega'} \in \mathbf{D}_{\omega'}$ задовольняє умовам функції ритму, а саме: 1) групі умов: 1.a) $T_{\omega'}(t_{ml}^{\omega'}, n) > 0$, якщо $n > 0$ ($T_{\omega'}(t_{ml}^{\omega'}, 1) < \infty$); 1.b) $T_{\omega'}(t_{ml}^{\omega'}, n) = 0$, якщо $n = 0$; 1.c) $T_{\omega'}(t_{ml}^{\omega'}, n) < 0$, якщо $n < 0$, $t_{ml}^{\omega'} \in \mathbf{D}_{\omega'} \subset \mathbf{R}$; 2) для будь-яких $t_{m_1 l_1}^{\omega'} \in \mathbf{D}_{\omega'}$ та $t_{m_2 l_2}^{\omega'} \in \mathbf{D}_{\omega'}$, для яких $t_{m_1 l_1}^{\omega'} < t_{m_2 l_2}^{\omega'}$, для функції $T_{\omega'}(t_{ml}^{\omega'}, n)$ виконується строга нерівність $T_{\omega'}(t_{m_1 l_1}^{\omega'}, n) + t_{m_1 l_1}^{\omega'} < T_{\omega'}(t_{m_2 l_2}^{\omega'}, n) + t_{m_2 l_2}^{\omega'}$, $\forall n \in \mathbf{Z}$; 3) функція $T_{\omega'}(t_{ml}^{\omega'}, n)$ є найменшою за модулем ($|T_{\omega'}(t_{ml}^{\omega'}, n)| \leq |T_{\omega'}^{\gamma}(t_{ml}^{\omega'}, n)|$) серед усіх таких функцій $\{T_{\omega'}^{\gamma}(t_{ml}^{\omega'}, n), \gamma \in \Gamma\}$, які задовольняють вище наведеним умовам 1 та 2. Аналіз серцевого ритму зводиться до статистичного аналізу елементів випадкової області визначення $\mathbf{D}(\omega')$ умовного циклічного випадкового процесу дискретного аргументу $\xi(\omega, t_{ml}(\omega'))$, або до статистичного аналізу його випадкової функції ритму $T(t_{ml}(\omega'), n)$. Випадкова функція ритму $T(t_{ml}(\omega'), n)$ повністю визначається елементами випадкової області $\mathbf{D}(\omega')$ згідно із формулою:

$$T(t_{ml}(\omega'), n) = t_{m+n, l}(\omega') - t_{m, l}(\omega'), m, n \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, t_{m, l}(\omega') \in \mathbf{D}(\omega'). \quad (1)$$

У випадку, якщо в аналізі серцевого ритму брати за основу випадкову функцію ритму $T(t_{ml}(\omega'), 1)$ умовного циклічного випадкового процесу $\xi(\omega, t_{ml}(\omega'))$, зберігаючи чітку прив'язку до фази серцевого циклу та номеру серцевого циклу, то математичну модель ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю подано як вектор випадкових послідовностей:

$$\mathbf{V}_L(\omega', m) = \left\{ \Delta T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, L}, m \in \mathbf{Z} \right\}, \quad (2)$$

де кожна l -та компонента вектора є випадковою послідовністю $\Delta T_l(\omega', m)$, значення якої дорівнює значенню випадкової функції ритму $T(t_{ml}(\omega'), 1)$ у моменти часу $t_{ml}(\omega')$ із дискретної множини $\mathbf{D}_l(\omega') = \{t_{ml}(\omega') \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l = \text{const}\}$, яка є вкладеною в $\mathbf{D}(\omega')$ і описує часові відстані між однотипними l -ми фазами досліджуваного електрокардіосигналу у двох його сусідніх циклах, а саме:

$$\Delta T_l(\omega', m) = T(t_{ml}(\omega'), 1) = t_{m+1, l}(\omega') - t_{m, l}(\omega'), m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, t_{m, l}(\omega') \in \mathbf{D}(\omega'). \quad (3)$$

У випадку, якщо в аналізі серцевого ритму брати за основу випадкову область $\mathbf{D}(\omega')$ умовного циклічного випадкового процесу $\xi(\omega, t_{ml}(\omega'))$, то математичну модель ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю подано як матрицю випадкових послідовностей:

$$\mathbf{M}(\omega', m) = \left\{ \Delta T_{l_1 l_2}(\omega', m), l_1 l_2 = \overline{1, L} \right\}, \quad (4)$$

де кожний елемент матриці $\mathbf{M}(\omega', m)$ є випадковою послідовністю $\Delta T_{l_1 l_2}(\omega', m)$, значення якої визначаються так:

$$\Delta T_{l_1 l_2}(\omega', m) = t_{m, l_2}(\omega') - t_{m, l_1}(\omega'), m \in \mathbf{Z}, l_1 l_2 = \overline{1, L}. \quad (5)$$

Елементи $\Delta T_{l_1 l_2}(\omega', m)$ матриці описують часові відстані (інтервали) між, загалом різнотипними, фазами l_1 та l_2 досліджуваного електрокардіосигналу у всіх його циклах, а саме, задають різниці між моментами часу $t_{m, l_1}(\omega')$ та $t_{m, l_2}(\omega')$ із дискретних множин $\mathbf{D}_{l_1}(\omega') = \{t_{m, l_1}(\omega') \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l_1 = \text{const}\}$ та $\mathbf{D}_{l_2}(\omega') = \{t_{m, l_2}(\omega') \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l_2 = \text{const}\}$, які є вкладеними в $\mathbf{D}(\omega')$ і стосується l_1 -ї та l_2 -ї фаз досліджуваного електрокардіосигналу.

У роботі обґрунтовано описувати ритмокардіосигнал із підвищеною роздільною здатністю як за допомогою деякої підмножини елементів випадкової матриці $\mathbf{M}(\omega', m)$ (коли необхідно досліджувати тривалості між різнотипними фазами електрокардіосигналу у рамках кожного його циклу), так і за допомогою підмножини елементів випадкового вектора $\mathbf{V}_L(\omega', m)$ (коли необхідно досліджувати часові відстані між однотипними фазами електрокардіосигналу у двох його сусідніх циклах). Тому, для математичного опису ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю обґрунтовано використовувати вектор $\Xi_L(\omega', m) = \left\{ T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, L}, m \in \mathbf{Z} \right\}$, елементи якого можуть бути як елементами із матриці $\mathbf{M}(\omega', m)$, так і елементи із вектора $\mathbf{V}_L(\omega', m)$, що сформувало логічні підстави для узгодженості конструктивної стохастичної моделі серцевого ритму та стохастичної моделі електрокардіосигналу, а також уможливило дослідження часової стохастичної динаміки серцевого ритму із підвищеною роздільною здатністю на основі методів математичної статистики. Розмірність (кількість компонент) L вектора $\Xi_L(\omega', m)$ визначає роздільну здатність ритмокардіосигналу та дорівнює кількості досліджуваних часових інтервалів між наперед виділеними фазами в електрокардіосигналі.

Шляхом уточнення та конкретизації ймовірнісних характеристик вектора $\Xi_L(\omega', m)$, розроблено математичну модель ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей, для якого характерним є інваріантність його сімейства функцій розподілу до часових зсувів. Досліджено структуру ймовірнісних характеристик ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, які витікають із властивостей інваріантності відповідних ймовірнісних характеристик вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей, та доповнюють відомі ймовірнісні характеристики векторного ритмокардіосигналу на базі відомої моделі у вигляді вектора випадкових величини.

У третьому розділі, з метою підвищення ступеня автоматизації аналізу серцевого ритму на базі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю у комп'ютерних системах функціональної діагностики стану серця людини, обґрунтовано метод автоматичного формування ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю із попередньо зареєстрованого електрокардіосигналу. На рисунку 1 (а) подано графік декількох циклів досліджуваної електрокардіограми, а на рисунку 1 (б) подано результат її сегментування на основі використаного у роботі методу.

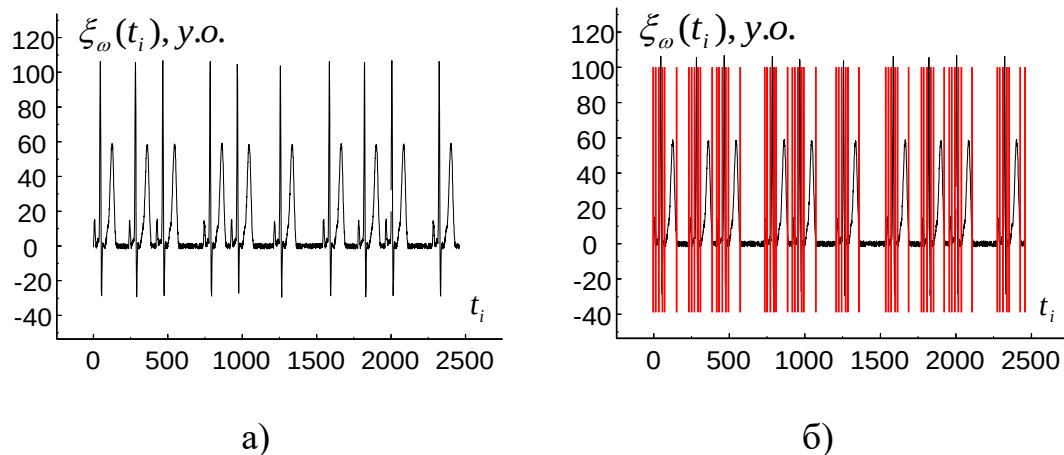


Рис. 1. Результати опрацювання: а) декілька циклів досліджуваної електрокардіограми; б) результат її сегментування на основі використаного у роботі методу, який ґрунтується на статистиці Бродського-Дарховського

На рисунку 2 подано графіки відносних похибок формування відліків ритмокардіограми із підвищеною роздільною здатністю, які відповідають R-R-інтервалам (рис. 2.а) та T-T-інтервалам (рис. 2.б) електрокардіограми, які отримані на основі нового методу сегментування, що ґрунтується на статистиці Бродського-Дарховського (позначені на графіку жирними крапками) та на основі відомого методу, що ґрунтується на використанні різницевої функції першого порядку (позначені на графіку трикутниками).

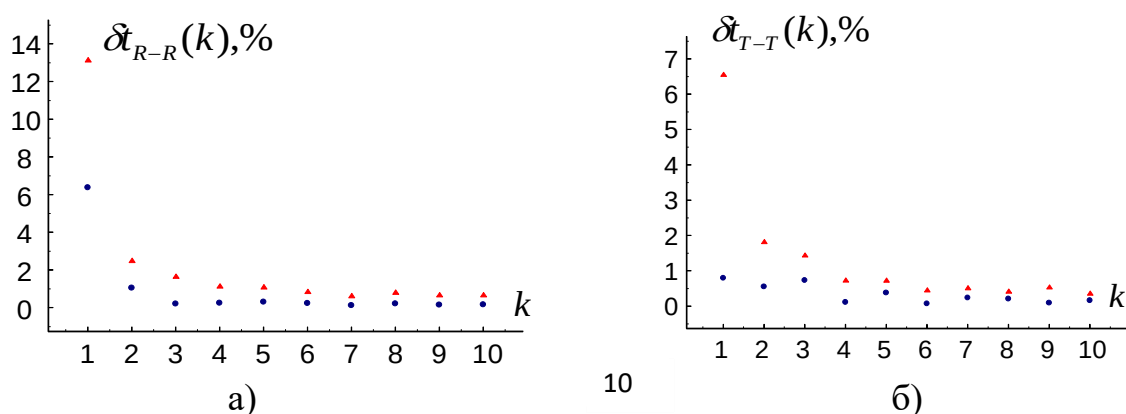


Рис. 2. Графіки відносних похибок формування відліків ритмокардіограми із підвищеною роздільною здатністю: а) графіки відносних похибок формування відліків ритмокардіограми із підвищеною роздільною здатністю, які відповідають R-R-інтервалам електрокардіограми; б) графіки відносних похибок формування відліків ритмокардіограми із підвищеною роздільною здатністю, які відповідають T-T-інтервалам електрокардіограми

Грунтуючись на компаративному аналізі відносних похибок автоматичного формування ритмокардіограми із підвищеною роздільною здатністю на основі нового методу, який ґрунтується на статистиці Бродського-Дарховського, та відомого методу, що ґрунтується на використанні різницевої функції першого порядку, встановлено, що обґрунтований у дисертації метод має вищу точність у порівнянні із відомим методом.

Підтверджено статистичні гіпотези про стаціонарність компонент ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, що забезпечило верифікацію його нової математичної моделі у вигляді вектора $\Xi_L(\omega', m)$ стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей. Як статистичний критерій перевірки гіпотез про стаціонарність було використано критерій Ст'юдента (для математичного сподівання компоненти векторного ритмокардіосигналу) та Фішера (для дисперсії компоненти векторного ритмокардіосигналу).

Розроблено статистичні методи опрацювання ритмокардіосигналів із підвищеною роздільною здатністю, які ґрунтуються на їх новій математичній моделі у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей. А саме, записані вирази для обчислення реалізацій статистичних оцінок функцій розподілу, змішаних початкових моментних функцій, змішаних центральних моментних функцій, матриці автокореляційних та взаємодкореляційних функцій, матриці автоковаріаційних та взаємодковаріаційних функцій, вектора початкових моментних функцій першого порядку (вектора математичних сподівань) стаціонарних та стаціонарно пов'язаних компонент векторного ритмокардіосигналу.

Проведено ряд статистичних експериментів для перевірки гіпотези про нормальність розподілу стаціонарних компонент векторного ритмокардіосигналу за критерієм згоди Пірсона. Результати цих експериментів не суперечать гіпотезі про нормальність розподілу векторного ритмокардіосигналу. Нормальність вектора $\Xi_L(\omega', m)$ є підставою для обґрунтування діагностичних ознак в системах аналізу серцевого ритму за ритмокардіограмою із підвищеною роздільною здатністю у рамках спектрально-кореляційної теорії, що суттєво знижує обчислювальну складність такого аналізу. У такому разі, для оцінювання ймовірнісної структури вектора $\Xi_L(\omega', m)$ стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей

достатньо здійснити статистичне оцінювання лише вектора $\mathbf{C}_L^1 = \{c_{1_{T_l}}, l = \overline{1, L}\}$

його математичних сподівань згідно із формулою (9) та матрицю кореляційних

функцій $\mathbf{R}_T = \left[r_{2_{T_1 T_2}}(u), l_1, l_2 = \overline{1, L} \right]$ згідно із формулою (10):

$$\hat{c}_{1_{T_l}} = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} T_{l_{\omega'}}(k), l \in \left\{ \overline{1, L} \right\}, \quad (9)$$

$$\hat{r}_{2_{T_1 T_2}}(u) = \hat{r}_{2_{T_1 T_2}}(m_1 - m_2) = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} \left(T_{l_1 \omega'}(k) - \hat{c}_{1_{T_1}} \right) \cdot \left(T_{l_2 \omega'}(k + u) - \hat{c}_{1_{T_2}} \right)$$

$$u = \overline{0, M_1 - 1}, m_1, m_2 \in \left\{ \overline{1, M_1} \right\}, l_1, l_2 \in \left\{ \overline{1, L} \right\}. \quad (10)$$

З метою зменшення розмірності діагностичного простору в інформаційних системах аналізу серцевого ритму, здійснено дискретне перетворення Фур'є елементів матриці $\hat{\mathbf{R}}_T$ оцінок кореляційних функцій, що породило відповідну матрицю $\hat{\mathbf{S}}_T$ їх Фур'є-образів. Грунтуючись на нерівності Бесселя, як діагностичні ознаки обґрунтовано використовувати підмножину перших відліків кожного Фур'є-образу із матриці $\hat{\mathbf{S}}_T$, які вносять вклад у повну енергію оцінки $\hat{r}_{2_{T_1 T_1}}(u)$ кореляційної функції не менше як 95%.

Як приклад, на рисунках 3 та 4 подано результат статистичного опрацювання однієї компоненти векторного чотирикомпонентного ритмокардіосигналу за однією його реалізацію $\Xi_{4_{\omega'}}(m) = \left\{ T_{l_{\omega'}}(m), l = \overline{1, 4}, m = \overline{1, 245} \right\}$, що сформована із електрокардіосигналу, який містив 245 серцевих циклів.

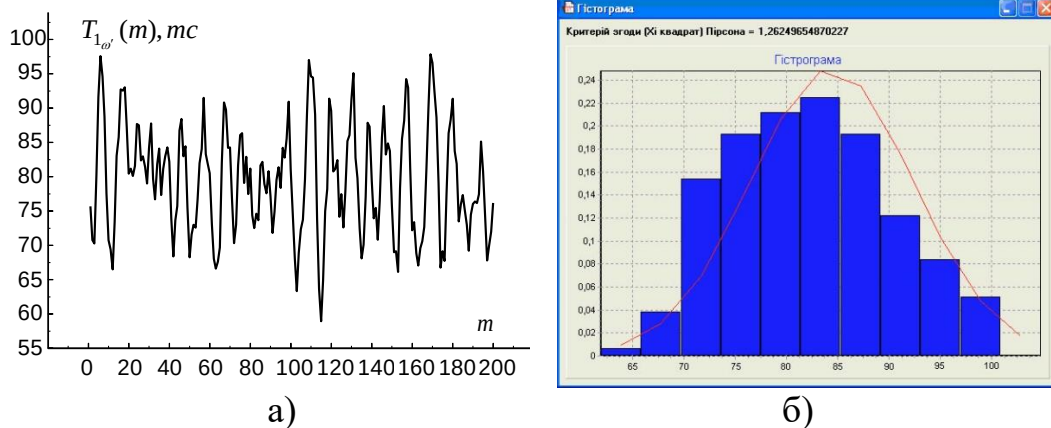


Рис. 3. Графіки: а) реалізації $T_{1_{\omega'}}(m)$ та б) гістограми першої компоненти $T_1(\omega', m)$, що описує тривалості ~ 12 зубців в електрокардіосигналі

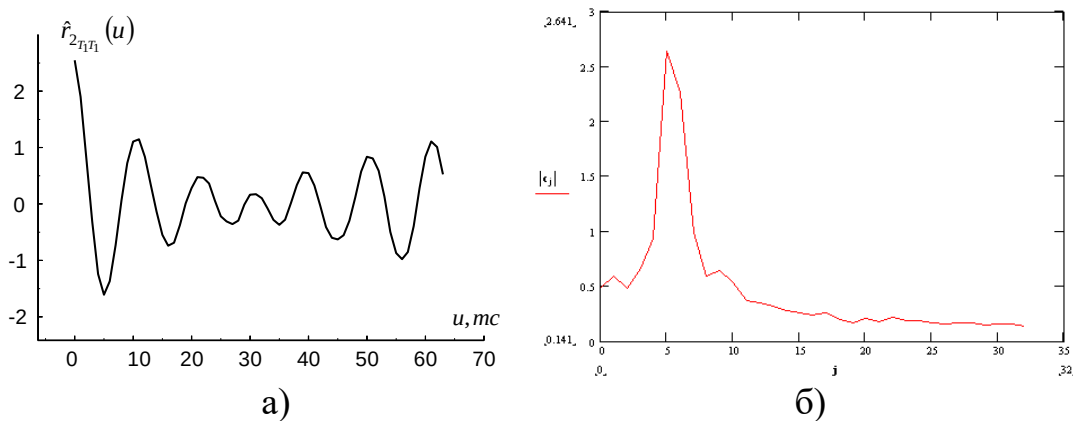


Рис. 4. Графіки: а) реалізації $\hat{r}_{2_{T_1 T_1}}(u)$ статистичної оцінки автокореляційної функції $r_{2_{T_1 T_1}}(u)$ ($l_1 = l_2 = 1$) та б) реалізації $\hat{S}_{2_{T_1 T_1}}(\nu)$ статистичної оцінки спектральної щільності потужності $S_{2_{T_1 T_1}}(\nu)$ першої компоненти $T_1(\omega', m)$

Наведені вище діагностичні ознаки, а саме, матриці кореляційних функцій та спектральних щільностей потужностей ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю суттєво доповнюють такі відомі діагностичні ознаки як його вектор математичних сподівань та вектор дисперсій, що є підґрунтям для підвищення рівня інформативності аналізу серцевого ритму у сучасних кардіодіагностичних системах із одночасним зменшенням розмірності діагностичного простору за рахунок використання не всієї множини значень функцій спектральної щільності потужності компонент векторного ритмокардіосигналу, а лише їх певної підмножини, які вносять вклад у повну енергію оцінки кореляційних функцій не менше 95%.

У четвертому розділі, результати, які розроблені у попередніх розділах дисертаційної роботи були втілені в систему комп'ютерних програм для опрацювання ритмокардіосигналів із підвищеною роздільною здатністю, що автоматизувало створені методи формування та статистичного аналізу векторного ритмокардіосигналу. Цю систему комп'ютерних програм втілено у багатофункціональний програмний комплекс для моделювання та автоматизованого аналізу широкого класу циклічних сигналів серця для потреб функціональної медичної діагностики, що модернізувало та розширило функціональні можливості існуючого програмного комплексу та дало змогу в автоматичний спосіб здійснювати аналіз серцевого ритму із підвищеною інформативністю. На рисунку 4.1 полено структурно-функціональну схему модернізованого програмного комплексу. 13

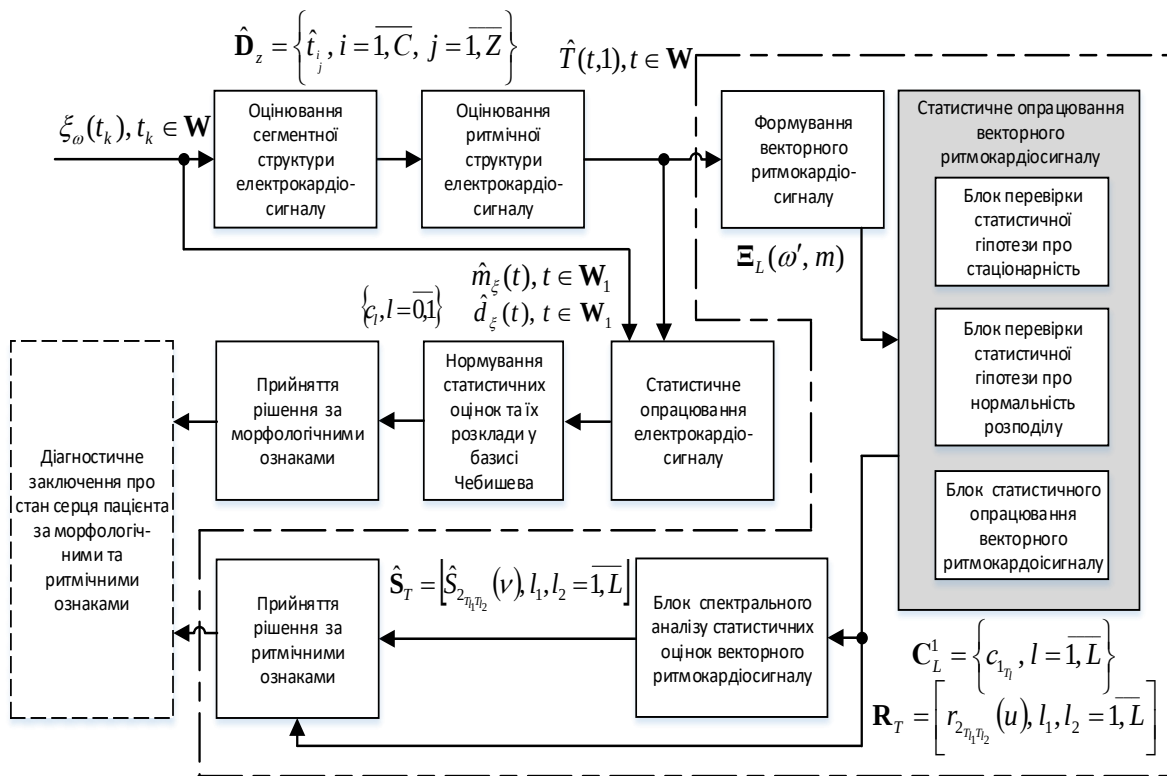


Рис. 4.1. Структурно-функціональна схема модернізованого програмного комплексу для морфоаналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю

Програмний комплекс реалізовано на мові програмування Object Pascal. Модернізація програмного комплексу полягає у його дооснащенні новими блоками, а саме, блоком автоматизованого формування векторного ритмокардіосигналу (ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю), блок статистичного аналізу векторного ритмокардіосигналу, а також блоком спектрального аналізу статистичних оцінок векторного ритмокардіосигналу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розробки нової математичної моделі та методів статистичного опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, які, за рахунок відображення його часової стохастичної динаміки та доповнення новими діагностичними ознаками, дають змогу підвищити рівень інформативності аналізу серцевого ритму у комп'ютерних системах функціональної діагностики стану серцево-судинної системи та адаптивно-регулятивних механізмів організму людини в цілому. Основні ¹⁴ тати та висновки проведених теоретичних та експериментальних досліджень полягають у наступному:

1. Розроблено нову математичну модель ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей, яка, у порівнянні із відомими математичними моделями серцевого ритму дає змогу підвищити рівень інформативності автоматизованого аналізу серцевого ритму та є логічно узгодженою зі стохастичною математичною моделлю електрокардіосигналу у вигляді умовного циклічного випадкового процесу.

2. Грунтуючись на розробленій математичній моделі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, записано вирази, що відображають збіжність у середньоквадратичному сенсі статистичних оцінок до відповідних його ймовірнісних характеристик, що уможливило розробку статистичних методів аналізу серцевого ритму із підвищеною інформативністю.

3. Розроблено метод автоматичного формування ритмокардіограми із підвищеною роздільною здатністю із попередньо зареєстрованої електрокардіограми, що повністю автоматизує процес аналізу серцевого ритму в комп'ютерних системах функціональної діагностики стану серця людини. Показано, що метод автоматичного формування ритмокардіограми із підвищеною роздільною здатністю, на основі методу сегментування та детектування екстремальних значень зон електрокардіограми, що ґрунтується на статистиці Бродського-Дарховського, має вищу точність у порівнянні із аналогічним методом, який ґрунтується на використанні різницевої функції першого порядку.

4. Здійснено верифікацію математичної моделі ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, шляхом перевірки статистичних гіпотез про стаціонарність на нормальну розподіленість компонент ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю та є підставою для зниження обчислювальної складності статистичних методів аналізу серцевого ритму в комп'ютерних системах медичної діагностики.

5. Розроблено статистичні методи аналізу ритмокардіосигналів із підвищеною роздільною здатністю, які ґрунтуються на їх новій математичній

моделі у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей, а саме, записано вирази для статистичних оцінок вектора математичних сподівань та матриці кореляційних функцій компонент векторного ритмокардіосигналу.

6. Обґрунтовано множину нових діагностичних ознак в комп'ютерних системах медичної діагностики за векторним ритмокардіосигналом для оцінювання стану регулятивних механізмів серцево-судинної системи та організму в цілому. А саме, відомі діагностичні ознаки за векторним ритмокардіосигналом доповнено такими новими діагностичними ознаками як матриця кореляційних функцій та матриця спектральних щільностей потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, які за рахунок відображення стохастичної часової динаміки серцевого ритму уможливають підвищення рівня інформативності аналізу серцевого ритму у сучасних кардіодіагностичних системах.

7. На основі нової математичної моделі та розроблених у дисертації методів опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, модернізовано багатофункціональний програмний комплекс для моделювання та автоматизованого аналізу широкого класу циклічних сигналів серця для потреб функціональної медичної діагностики. А саме, як складову цього програмного комплексу, розроблено систему комп'ютерних програм для автоматизованого формування та статистичного аналізу серцевого ритму на базі векторного ритмокардіосигналу (ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю), що розширило функціональні можливості існуючого програмного комплексу та дало змогу в автоматичний спосіб здійснювати аналіз серцевого ритму із підвищеною інформативністю.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Лупенко С. Математичне моделювання та методи опрацювання сигналів серця на базі циклічних випадкових процесів та векторів. / Лупенко С., Зозуля А., Сверстюк А., Стадник Н. // Sciences and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VI(20), ISSUE 172, July 2018. Budapest 2018. pp. 47-54. (Індексується в Index Copernicus).

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

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

4. Lupenko S. The comparative analysis of mathematical models of cyclic signals structure and processes. / Lupenko S, Osukhivskas H., Lutsyk N., Stadnyk N., Zozulia A., N. Shablii. // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, No 2 (82).— Ternopil 2016. – pp. 115-127. ISSN 1727-7108. (Індексується в Index Copernicus).

5. Литвиненко Я.В. Методи статистичного опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю на основі його моделі у вигляді вектора стаціонарних випадкових послідовностей. / Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Ониськів П.А., Триснюк В.М., Зозуля А.М.// Системи управління, навігації та зв'язку.Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. 2(60).2020. С.75-85. (Індексується в Index Copernicus).

6. Литвиненко Я.В. Математична модель ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей /Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Ониськів П.А., Триснюк В.М., Зозуля А.М. // Сучасні інформаційні системи. Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет» Т.4. №2. С.42-47.

7. Литвиненко Я.В. Програмний комплекс для автоматизованого аналізу серцевого ритму на основі векторного ритмокардіосигналу / Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Ониськів П.А., Триснюк В.М., Зозуля А.М. // Математичне моделювання в економіці. Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ – 2020. – № 1. – С. 41–55. (Індексується в Index Copernicus).

8. Литвиненко Я.В. Умовний циклічний випадковий процес дискретного аргументу як узагальнена математична модель циклічних сигналів із подвійною стохастичністю / Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Ониськів П.А., Зозуля А.М. // Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво», м. Луцьк – 2020. Випуск №39. – С. 60-69. (Індексується в Index Copernicus).

9. Зозуля А.М. Метод автоматичного породження векторного ритмокардіосигналу в комп'ютеризованих системах аналізу серцевого ритму / Зозуля А.М., Литвиненко Я.В., Луцик Н.С., Лупенко С.А., Ясній О.П.// Вісник ТНТУ ім.І.Пулюя. - Тернопіль.: ТНТУ Т. 22, №.1 – 2020. — С.164-174. (Індексується в Index Copernicus).

10. Зозуля А.М. Стан дослідження та використання електричних сигналів серця людини. Збірник наукових праць Севастопольського національного інституту атомної енергії та промисловості. №10. 2004. С.100-114.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. 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. —Т. 1, pp. 360-363. ISBN 978-1-5386-6463-6. IEEE Catalog Number: CFP18D36-PRT. (Індексується в Scopus).

12. Lupenko S. The Modeling and Diagnostic Features in the Computer Systems of the Heart Rhythm Analysis with the Increased Informativeness. / Lupenko S., Lutsyk

N., Yasniy O., Zozulia A. // 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). IEEE, 2019. pp. 121-124. (*Індексується в Scopus*).

13. Lupenko S. Scientific and methodological approach to modeling, processing and computer simulation of heart signals. / Lupenko S, Lutsyk N., Zozulia A. // VI міжнародна конференція студентів oraz докторантів „Інżynier XXI wieku” 02.12. 2016. – Bielsko-Biała, Poland 2016. –pp. 483-488. ISBN 978-83-65182-51-7.

14. Драган Я. Математична модель тонового сигналу для відшукування прихованих закономірностей ритміки серця людини. / Драган Я., Зозуля А. // Матеріали V наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, 24-26 квітня 2001 р. – Тернопіль: ТДТУ, 2001. – с. 13.

15. Зозуля А. Відшукування прихованих закономірностей в кардіосигналах підчас динамічного навантаження серця людини шляхом обробки їх математичної моделі. Матеріали сьомої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, 22-24 квітня 2003 р. – Тернопіль: ТДТУ, 2003. – с. 10.

Праці, які додатково відображають 17 ківі результати дисертації:

16. Trysnyuk V. Improvement of the complex evaluation method of vital activity risks. / V.Trysnyuk, O.Demydenko, K.Smetanin., A.Zozulia // Conference Ceoinformatics, 2020. May 14-16, 2020. (*Індексується в Scopus*).

17. Лупенко С.А. Лінійні циклічні випадкові функції як математичні моделі сигналів та просторово-часових полів серця. / Лупенко С.А., Шаблій Н.Р., Стадник Н.Р., Зозуля А.М. // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій", 17-18 листопада 2016 р. – Тернопіль: ТНТУ, 2016. – с. 65-66.

АНОТАЦІЇ

Зозуля А.М. Моделювання та методи статистичного опрацювання ритмокардіосигналів із підвищеною роздільною здатністю. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи».—Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору, Київ, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання розробки нової математичної моделі та методів статистичного опрацювання ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, у комп'ютерних системах функціональної діагностики стану серцево-судинної системи та адаптивно-регуляторних механізмів організму людини. Розроблено нову математичну модель ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю у вигляді вектора стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей. Розроблено метод автоматичного формування ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю із електрокардіосигналу, який має вищу точність у порівнянні із аналогічним

методом. Розроблено статистичні методи оцінювання ймовірнісних характеристик ритмокардіосигналів із підвищеною роздільною здатністю. Обґрунтовано нові діагностичні ознаки у вигляді матриці кореляційних функцій та матриці спектральних щільностей потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу. Розроблено систему комп'ютерних програм для аналізу серцевого ритму із підвищеною інформативністю.

Ключові слова: математичне моделювання, методи статистичного оцінювання, вектор стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей, електрокардіосигнал, ритмокардіосигнал, серцевий ритм.

ANNOTATION

Zozulia A.M. Modeling and methods of statistical processing rhythmic cardio signals with increased resolution. – Qualifying scientific paper on the rights of the manuscript.

Dissertation is submitted for the scientific degree of Candidate of Sciences (Engineering) in specialism 01.05.02 «Mathematic modeling and calculating methods». – Institute of Telecommunications and Global Information Space, Kiev, 2020.

18

The thesis is devoted to the solving of an actual scientific problem, such as development of a new mathematical model and methods in statistical processing of a rhythmic cardiac signal with the increased resolution, which, due to the reflection of its time stochastic dynamics and the addition of new diagnostic features, allow to increase the level of informativeness of heart rate analysis in computer systems of functional diagnostics cardiovascular system and adaptive-regulatory mechanisms of the human body as a whole.

It was developed a mathematical model of rhythmocardiosignal with increased resolution in the form of a vector of stationary and stationary-related random sequences that in comparison with the known mathematical models of the classical rhythmocardiosignal, , allows to increase the level of informativeness of heart rate analysis, and in comparison with the vector of random variables as a known mathematical model of the rhythmocardiosignal with increased resolution, allows to take into account the stochastic time dynamics of heart rate. The structure of probabilistic characteristics of the rhythmocardiosignal with increased resolution, which follow from the properties of invariance of the corresponding probabilistic characteristics of the vector of stationary and stationary-related random sequences, is researched.

Automatic formation method of the rhythmocardiosignal with increased resolution, by segmentation and characteristic zones detection of the electrocardiogram is developed. Statistical methods for processing rhythmocardiosignals with increased resolution have been developed, namely, it was written expressions for calculating the statistical estimates realizations of distribution functions, mixed initial moment functions, mixed central moment functions, matrix of autocorrelation and intercorrelation functions, matrix of autocovariance and intercovariance functions,

vector of initial moment functions of the first order (vector of mathematical expectations) stationary related components of the vector rhythmocardiosignal. the known diagnostic features of the vector rhythmocardiosignal are supplemented by such new diagnostic features as the matrix of correlation functions and the matrix of power spectral power densities of stationary components of the rhythmocardiosignal with increased resolution, which is the basis for increasing the level of heart rate analysis informativeness in modern cardiodiagnostic systems with simultaneous reducing the dimensionality of the diagnostic space by using not the whole set of values of power spectral density functions of the vector rhythmocardiogram components, but only a certain subset of them, which contribute to the total energy of correlation functions estimation not less than 95%. I was developed system of computer programs for heart rate analysis with increased informativeness.

Keywords: mathematical modeling, statistical evaluation methods, vector of stationary and stationary-related random sequences, electrocardiosignal, rhythmocardiosignal, heart rate.