

**Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя**

Дунець Василь Любомирович

УДК 616.12:519.218

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ОПРАЦЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОКАРДІОСИГНАЛУ ПРИ ФІЗИЧНОМУ
НАВАНТАЖЕННІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ
КАРДІОДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ**

01.05.02 — *математичне моделювання та обчислювальні методи*

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

Тернопіль – 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник доктор фізико-математичних наук, професор
Драган Ярослав Петрович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
професор кафедри програмного забезпечення
автоматизованих систем, м. Львів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Овсяк Володимир Казимирович,
Українська академія друкарства, професор кафедри
автоматизації та комп’ютерних технологій,
м. Львів;

кандидат технічних наук, доцент
Сверстюк Андрій Степанович,
Тернопільський державний медичний
університет імені Івана Яковича Горбачевського,
доцент кафедри медичної інформатики,
м. Тернопіль.

Захист відбудеться _____2013 р. о ____ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради **К 58.052.01** у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розіслано _____2013 р.

*Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 58.052.01*

Шелестовський Б. Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За статистичними даними Європейської Співки Кардіологів спостерігається тенденція зростання раптової смертності підлітків під час фізичних навантажень. Станом на 2012 рік вона становила 2,3 % на 100000 підлітків, із них 2,1 % - раптова смертність від прихованих захворювань серцево-судинної системи (ССС). Таку високу смертність лікарі пов'язують із розвитком науково-технічного прогресу та негативним впливом на функціональний стан організму таких факторів: суцільна комп'ютеризація, що призводить до пасивного способу життя, нераціональне харчування, погіршення екології, сезонність та ін. Тому контроль і своєчасна діагностика стану СССР при фізичному навантаженні та адаптивних можливостей організму людини є актуальним завданням.

З метою запобігання смертностей під час фізичних навантажень у спортивній медицині використовують скринінгові обстеження, в яких для діагностування стану СССР та проявів прихованих патологій проводять за допомогою функціональних проб (ФП) у вигляді дозованого фізичного навантаження. Зокрема в Україні згідно з наказом Міністерства охорони здоров'я в навчальних закладах використовують ФП Руф'є (30 присідань за 45 с.), де основним джерелом інформації про стан СССР слугує електрокардіосигнал (ЕКС). Належне опрацювання ЕКС дає змогу виявити функціональні зміни у СССР та вибрати методику проведення профілактичних заходів, а у випадку патологічних порушень запобігти розвитку хвороби відповідним лікуванням.

Ефективність вибору профілактично-терапевтичних заходів залежить від належного використання кардіодіагностичних систем, зокрема CARDIO (Pallar Ltd. Co, Україна), ЮКАРД-200 (Ютас, Росія), General Electric Medical Systems IT (Німеччина), Micro AM (Kontron, Франція), Medilog-Ex (Oxford, Англія), в яких для оцінювання стану СССР при фізичному навантаженні застосовують методи морфологічного аналізу, що використовуються як показники амплітуд і часових тривалостей ЕКС. Програмне забезпечення у таких системах базується на методах гармонічного аналізу, що визначаються детермінованою математичною моделлю у вигляді суміші періодичних функцій. Однак така модель не враховує стохастичного характеру ЕКС як відображення функціонального стану СССР. У випадку стохастичного підходу використовують часткові математичні моделі, а саме: адитивну, мультиплікативну й адитивно-мультиплікативну як поєднання детермінованої періодичної функції та стаціонарного в широкому розумінні випадкового процесу. Проте ці моделі не дають змоги описати коливання у часі, що є суттєвим при дослідженні фазово-часової структури ЕКС з метою виявлення комплексу прояву змін у функціонуванні СССР при фізичному навантаженні.

Наведені аргументи вказують на актуальність обґрунтування адекватної математичної моделі ЕКС та розроблення методу її статистичного опрацювання для кардіодіагностичних систем, зорієнтованих на підвищення точності оцінювання функціонального стану СССР при фізичному навантаженні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи пов'язана із загальним напрямком роботи кафедри біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені

Івана Пулюя, зокрема із науковими темами: ВК 37-11, “Дослідження змін функціонального стану організму людини за біосигналами засобами енергетичної теорії стохастичних сигналів”, номер державної реєстрації № 0111U005289, 2011-2013 р.р. Вклад дисертанта полягає у розробленні програмного забезпечення та методу статистичного опрацювання ЕКС людини при фізичному навантаженні; ДІ 188-12, “Розробка математичного та програмного забезпечення інформаційних систем діагностики та аутентифікації людини за циклічними біометричними сигналами”, інвентарний номер державної реєстрації № 0112U002203, 2011-2013 рр. Вклад дисертанта полягає у розробленні методу комп’ютерного імітаційного моделювання ЕКС людини.

Мета і задачі дослідження. *Метою дослідження є обґрунтування математичної моделі та розроблення методу статистичного опрацювання електрокардіосигналу при фізичному навантаженні, сформованого на базі цієї моделі, для підвищення точності кардіодіагностичних систем. Досягнення цієї мети вимагає розв’язання таких задач:*

1. Провести огляд відомих математичних моделей електрокардіосигналу та методів їх опрацювання у кардіодіагностичних системах для обґрунтування напрямку наукового дослідження.
2. Обґрунтувати вибір математичної моделі електрокардіосигналу, для розв’язання задач своєчасного виявлення змін у функціонуванні серцево-судинної системи при фізичному навантаженні.
3. Розробити метод статистичного опрацювання та комп’ютерного імітаційного моделювання електрокардіосигналу при фізичному навантаженні на основі обґрунтованої математичної моделі для підвищення точності кардіодіагностичних систем.
4. Обґрунтувати застосовність нових інформативних ознак електрокардіосигналу при фізичному навантаженні та спосіб оцінювання адаптивних можливостей організму людини.
5. Розробити програмне забезпечення для опрацювання електрокардіосигналу при фізичному навантаженні для верифікації обґрунтованої математичної моделі та статистичного методу опрацювання даних.

Об’єкт дослідження: процес опрацювання електрокардіосигналу людини при фізичному навантаженні.

Предмет дослідження: математична модель електрокардіосигналу при фізичному навантаженні у вигляді періодично корельованого випадкового процесу та її властивості для підвищення точності кардіодіагностичних систем.

Методи дослідження: засобами енергетичної теорії стохастичних сигналів, зокрема періодично корельованих випадкових процесів, дано обґрунтування математичної моделі електрокардіосигналу й оцінювання його характеристик та статистичної теорії вибору рішень при верифікації математичної моделі електрокардіосигналу. Для програмної реалізації алгоритмів опрацювання сигналу використано пакет прикладних програм MATLAB 2011a.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше на основі аналізу імпульсної структури електрокардіосигналу обґрунтовано застосовність періодично корельованого випадкового процесу як

його математичну модель, що дало змогу врахувати у структурі моделі періодичність та випадковість серцевих циклів при фізичному навантаженні.

2. Вперше на базі обґрунтованої математичної моделі удосконалено метод статистичного опрацювання електрокардіосигналу, що уможливило обчислення оцінок імовірнісних характеристик сигналу при фізичному навантаженні.
3. Вперше застосовано нові в галузі діагностики стану серцево-судинної системи при фізичному навантаженні інформативні ознаки електрокардіосигналу, що ними є кореляційні компоненти, які відповідають функціональному стану серцево-судинної системи людини.
4. Вперше, на основі обґрунтованої математичної моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу розроблено комп'ютерну імітаційну модель електрокардіосигналу при фізичному навантаженні, результати застосування якої підтвердили добре узгодження комп'ютерного експерименту з емпіричними даними.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що на базі обґрунтованої математичної моделі та розробленого методу статистичного опрацювання електрокардіосигналу при фізичному навантаженні, удосконалено відомі методи його аналізу, які дадуть змогу розширити можливості кардіодіагностичних систем шляхом впровадження нового класу достовірних інформативно-інваріантних ознак, що ними є кореляційні компоненти. Розроблена комп'ютерна імітаційна модель електрокардіосигналу при фізичному навантаженні придатна для тестування алгоритмів опрацювання даних з метою контролю та оцінювання стану ССС.

Результати дисертаційного дослідження використані в навчальному процесі на кафедрі нормальної фізіології Тернопільського державного медичного університету ім. І.Я.Горбачевського, діагностичному центрі Тернопільської комунальної міської лікарні №2.

Особистий внесок. Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані дисертантом самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить:

- у працях [1,8] – обґрунтовано математичну модель електрокардіосигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу;
- у працях [2,13] – застосовано синфазний метод опрацювання електрокардіосигналу для визначення стану серцево-судинної системи;
- у працях [3,12] – розроблено комп'ютерну імітаційну модель електрокардіосигналу у вигляді суми синусоїд;
- у працях [4,14] – розроблено комп'ютерну імітаційну модель електрокардіосигналу на базі періодично корельованого випадкового процесу;
- у працях [5,13] – розроблено спосіб опрацювання електрокардіосигналу при фізичному навантаженні, використовуючи ковзне вікно;
- у працях [7,15] – обґрунтовано стохастичну модель для визначення стану серцево-судинної системи при фізичному навантаженні;
- у праці [11] – застосовано компонентний метод опрацювання електрокардіосигналу для визначення стану серцево-судинної системи.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертаційній роботі результати доповідалися і обговорювалися на дев'ятій, десятій, одинадцятій, дванадцятій та всеукраїнській науково-технічних конференціях Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 2005-2011), на п'ятій міжнародній науково-практичній конференції “Комп’ютерні системи в автоматизації виробничих процесів” (Хмельницький, 2007), п'ятій міжнародній конференції “Теоретичні та прикладні аспекти побудови програмних систем” (Київ-Чернігів, 2008), міжнародній науково-практичній конференції “Современные направления теоретических и прикладных исследований ‘2011” (Одесса, 2011) наукових семінарах кафедри біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

В цілому роботу апробовано на наукових семінарах кафедри біотехнічних систем Національного технічного університету імені Івана Пулюя (м.Тернопіль), інституту комп’ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів) факультеті комп’ютерних наук Національного університету імені Юрія Федьковича (м. Чернівці).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, 7 із них – статті у наукових фахових виданнях [1-7], 8 тез наукових конференцій [8-15]. Праці 6,9,10 опубліковано без співавторів.

Структура та обсяг. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, викладених на 91 сторінці, списку використаних джерел з 106 назв на 11 сторінках, додатків на 22 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 124 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі шляхом аналізу та порівняння властивостей і характеристик відомих математичних моделей ЕКС, а також статистичних методів їх опрацювання, обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено зв’язок роботи з науковою темою, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об’єкт, предмет і методи дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, розкрито питання апробації результатів дисертації на конференціях і семінарах та висвітлення їх у публікаціях.

У першому розділі на основі огляду літературних джерел встановлено, що індикатором стану людського організму є ритм і сила серцевих пульсацій. Тобто носієм відомостей у даному разі виступає ЕКС. Тому, яким би не був механізм його формування, для ідентифікації цього стану застосовна у практиці вся теорія ритміки, коли для опису періодичних коливань використовують математичні моделі, побудовані на основі детермінованого та стохастичного підходів, а інформативні характеристики (для потреб практичного застосування) отримують засобами теорії ймовірностей та математичної статистики.

Однак, під час фізичного навантаження, у ЕКС потрібно враховувати не тільки випадковість (стаціонарна модель), але й нестаціонарність його стохастичних коливань у часі. У працях Я.П. Драгана, Л.Б. Чорної, Г.М. Осухівської, Є.Б. Яворської, Л.Є. Дедіва показано, що ефективною й адекватною математичною

моделлю стохастичного коливання, зокрема ритміки серця, є періодично корельований випадковий процес (ПКВП) – у разі однопериодного ритму, зокрема модель стохастичного коливання R-R інтервалів. Проте для задачі оцінювання стану ССС при фізичному навантаженні потрібно враховувати не тільки зміну R-R інтервалів, а й споріднені з ним поліперіодно корельовані випадкові процеси, які відображаються у зміні P,Q,R,S,T,U зубців ЕКС людини при фізичному навантаженні. Тому постає задача обґрунтування адекватної математичної моделі ЕКС, яка б у своїй структурі враховувала як ритм серця, так і вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на функціональний стан організму людини при фізичному навантаженні.

Враховуючи специфіку поставлених задач та відомі підходи до їх розв'язання, сформульовано вимоги до математичної моделі ЕКС.

У другому розділі проаналізовано характеристики ЕКС при фізичному навантаженні засобами гармонічного та кореляційного аналізів. Враховуючи отримані характеристики, обґрунтовано вибір математичної моделі ЕКС у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП).

Для обґрунтування математичної моделі використано ЕКС при фізичному навантаженні, який спровоковано фізичним дозованим подразником у вигляді функціональної проби (ФП) Руф'є. Експериментально зареєстрований системою "CardioSens" (Україна, розробник - Науково-технічний центр радіоелектронних медичних приладів та технологій «ХАІ-МЕДІКА»)/ ЕКС при фізичному навантаженні зображено на рис. 1.

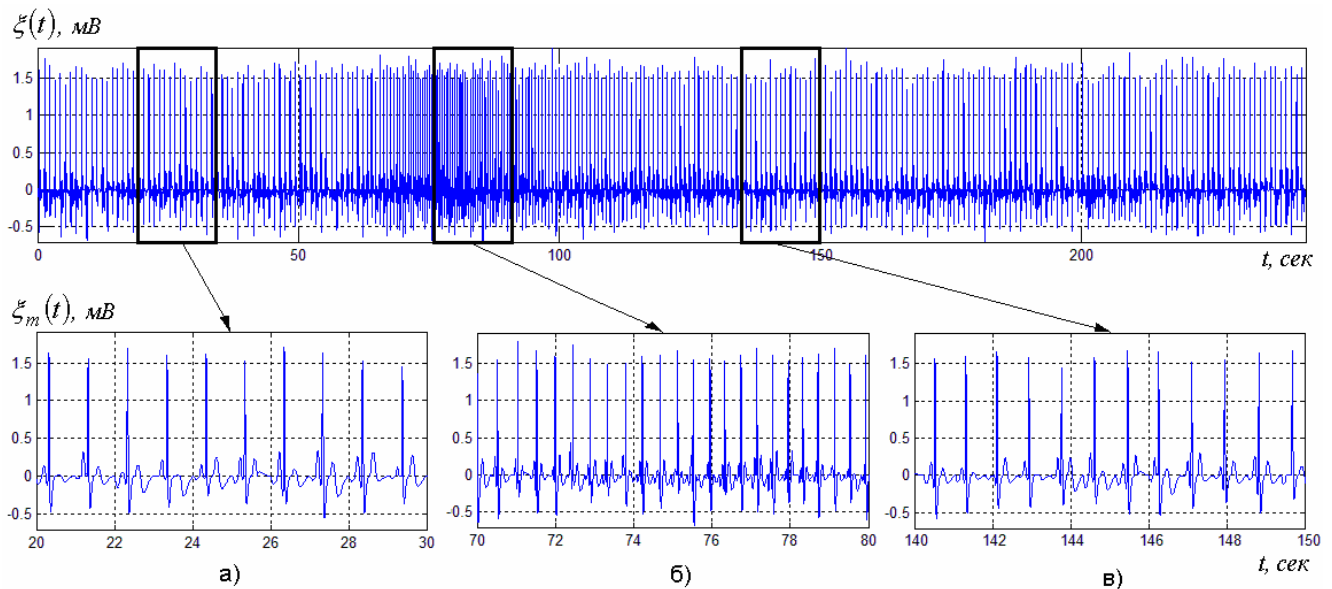


Рис. 1. Експериментально зареєстрований ЕКС при дозованому фізичному навантаженні: (а) стан спокою, (б) стан навантаження, (в) стан відновлення

Враховуючи факт, що інформативною характеристикою стану ССС є адаптивність до змін при фізичному навантаженні, яка проявляється у зміні періодів упродовж усієї реалізації сигналу ($T_{\text{спокою}} \neq T_{\text{навантаження}} \neq T_{\text{відновлення}}$), ЕКС доцільно аналізувати по вибірках із періодом корельованості T_m . Тоді модель ЕКС при фізичному навантаженні набуде вигляду:

$$\xi_m(t) = \xi(t) \cdot \chi_{D_m}(t), \quad t \in \mathbb{R}, \quad (1)$$

де $\xi_m(t)$, $t \in D_m$ – реалізація вибірки ЕКС з періодом T_m у межах m -ого ковзного вікна на відрізку D_m (рис. 2);

$$\chi_{D_m}(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t \in D_m \\ 0, & \text{якщо } t \notin D_m \end{cases} \quad \text{– індикаторна функція відрізка } D_m \text{ (ковзне вікно):}$$

$D_m = [m \cdot \Delta t, m \cdot \Delta t + S_w)$ – тривалість m -го ковзного вікна, $\Delta t = \text{const}$ – крок зсуву ковзного вікна.

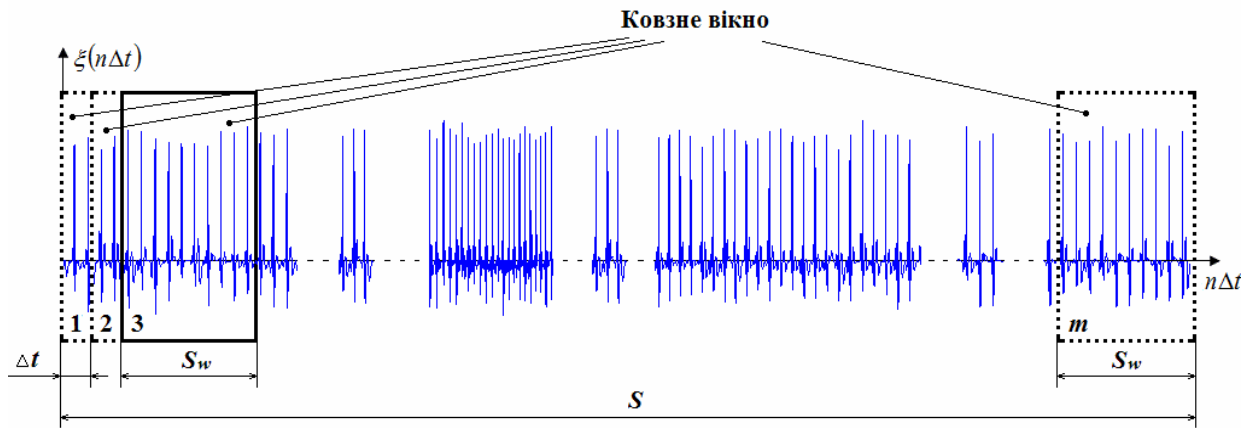


Рис. 2. Зображення ковзного вікна на часовій реалізації ЕКС при фізичному навантаженні

Розгляд вибірок $\xi_m(t)$ із реалізації ЕКС $\xi(t)$ (стан спокою, стан навантаження та стан відновлення) підтверджує, що імпульсна структура сигналу не змінюється, а змінюються тільки його амплітуда та часові тривалості зубців. Тому згідно з принципом Слуцького, що коливна система може тільки коливатися за притаманним їй тим самим законом, хоч з відмінними від попередніх характеристиками, проаналізовано вибірки ЕКС засобами гармонічного та кореляційного аналізів.

Результати аналізу вибірок ЕКС засобами гармонічного аналізу підтверджують, що отримані амплітудні спектри (рис.3) є мінливими. Це свідчить про наявність у сигналі стохастичної складової.

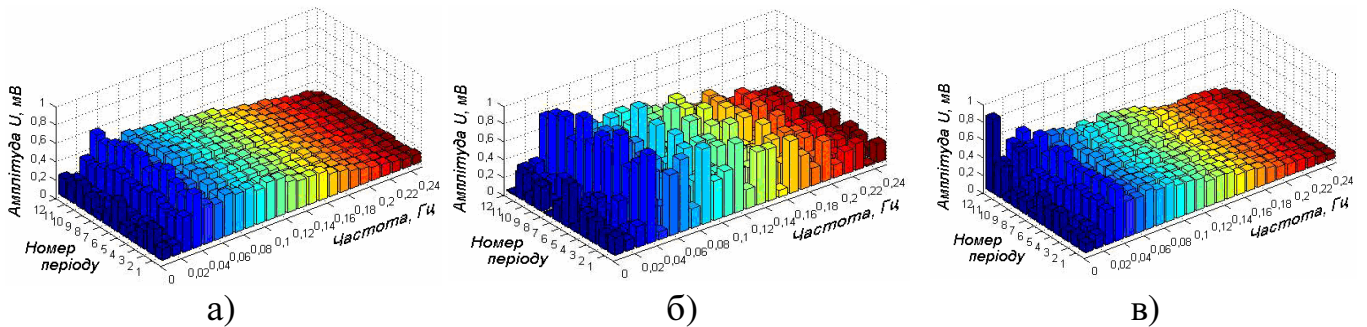


Рис. 3. Амплітудні спектри вибірок електрокардісигналу: а) стан спокою, б) стан навантаження, в) стан відновлення

Розгляд вибірок ЕКС засобами кореляційного аналізу, показує, що автокореляційна функція $R(u)$ від ЕКС (перетворення Фур'є якої і дає спектр потужності) є періодичною і циклічно зникаючою в часі (рис.4).

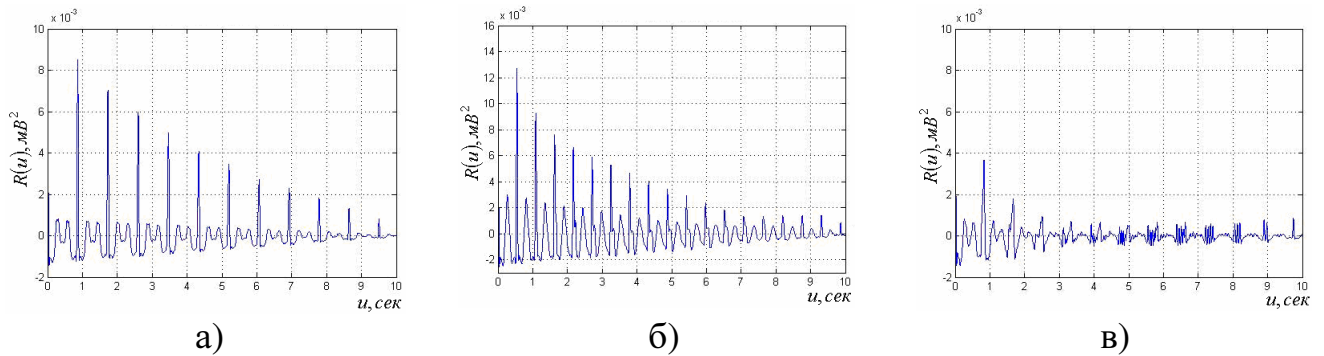


Рис. 4. Реалізації автокореляційних функцій вибірок електрокардісигналу: а) стан спокою; б) стан навантаження; в) стан відновлення

З проведеного аналізу характеристик сигналу випливає, що адекватна математична модель вибірок ЕКС повинна мати властивості випадковості (зумовленої впливами зовнішніми та внутрішніми факторами), періодичності (спричиненої роботою серця) та мати засоби, щоб описати періодичність коливань у часі, що є важливим показником при виявленні моменту прояву змін у функціонуванні ССС.

У термінах енергетичної теорії стохастичних сигналів ці вимоги задовольняє модель у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП) класу π^T , зі скінченною середньою за період корельованості T потужністю $P_\xi = \frac{1}{T} \int_0^T R_\xi(t, t) dt < \infty$, де $R_\xi(t, s)$ - кореляційна функція, яка задовольняє умову $R_\xi(t, s) = R_\xi(t+T, s+T)$, $T > 0$ для всіх $t, s \in \mathbf{R}$, як і математичне сподівання – умову $m_\xi(t+T) = m_\xi(t)$, при всіх $t \in \mathbf{R}$.

Розглядаючи вибірки ЕКС (рис. 1) $\xi_m(t), t \in D_m$ як реалізації ПКВП із періодом корельованості T_m , їх доцільно зобразити через стаціонарні компоненти

$$\xi_m(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \xi_{mk}(t) e^{i \frac{2\pi}{T_m} kt}, \quad (2)$$

де $\xi_{mk}(t), k \in \mathbf{Z}$ - стохастична складова у вигляді стаціонарних компонент m -ої вибірки ЕКС $\xi_m(t)$;

$e^{i \frac{2\pi}{T_m} kt}$ - періодичні множники m -ої вибірки ЕКС.

Вираз (2) дає змогу описати часову мінливість ЕКС та поєднати у його структурі як стохастичну, так періодичну складові сигналу, і має засоби, щоб описати нестационарні коливання ЕКС шляхом розкладання сигналу на стаціонарні

компоненти. Тому для опрацювання (стаціонарних компонент ЕКС) застосовна вся теорія ймовірності та математичної статистики.

У третьому розділі з урахуванням медичних методик дослідження адаптивних можливостей організму людини за допомогою дозованого фізичного навантаження розроблено метод статистичного опрацювання ЕКС при фізичному навантаженні в термінах обґрунтованої математичної моделі.

В межах m -ого ковзного вікна ЕКС при фізичному навантаженні опрацьовується синфазним методом, який базується на тому, що еквідистантні відліки значень ЕКС через період корельованості $\xi_{km}(t_0) = \{\xi(t_0 + kT + mS_w), k \in \mathbb{Z}, t \in \mathbb{R}\}$, творять стаціонарні векторні випадкові послідовності $\{\xi_{km}(t_0), t_0 \in [0, T_m]\}$, а при різних початкових фазах t_0 та t'_0 - і стаціонарно пов'язані випадкові послідовності. На основі даного методу отримуються статистичні оцінки ймовірнісних характеристик ЕКС (кореляційні компоненти $\hat{B}_{km}(u)$) в межах m -го ковзного вікна

$$\hat{B}_{km}(u) = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} \hat{b}_{\xi_m}(t, u) e^{-i \frac{2\pi}{T_m} kt} dt, \quad (3)$$

де $\hat{B}_{km}(u)$ – оцінки кореляційних компонент, які кількісно характеризують фазово-часову структуру ЕКС в межах m -ого ковзного вікна; u – зсув;

$\hat{b}_{\xi_m}(t, u) = \frac{1}{N_m} \sum_{k=0}^{N_m-1} x(t + u + kT + mS_m) x(t + kT + mS_m)$ – оцінки параметричної

кореляції, яка дає змогу охарактеризувати часову мінливість ЕКС у межах m -ого ковзного вікна.

Для застосування синфазного методу необхідно апріорно знати значення періоду корельованості T_m ЕКС як ПКВП, який має бути однаковим з періодом найнижчої гармоніки ЕКС у межах m -ого ковзного вікна. Такою гармонікою є частота серцевих скорочень (ритм, який задає синусовий вузол), що у випадку фізичного навантаження є показником стану ССС. Однак не існує прямих способів визначення періоду корельованості за реалізацією ЕКС як ПКВП, оскільки періодичність є ознакою не випадкового процесу, а його ймовірнісних характеристик $(m_{\xi_m}(t), r_{\xi_m}(t, u))$. Вихід з такої ситуації дає формулювання цієї задачі як поєднання задач оптимізації та перевірки в рамках статистики ПКВП гіпотези про пробний період (пробну частоту).

Для цього слід верифікувати гіпотезу, що період корельованості T_m є якимось зі значень у певному інтервалі $[T_{1m}, T_{2m}]$ за статистиками, обчисленими при різних фіксованих значеннях пробного періоду T_{pm} із множини усіх можливих $\{T_{pm}\} \subseteq [T_{1m}, T_{2m}]$.

Оскільки ЕКС при поданні його у вигляді ПКВП трактується як континуальна

сукупність залежних від початкової фази (відліку) t_0 стаціонарних випадкових послідовностей, тоді при оцінюванні $m_{\xi_m}(t)$ та $r_{\xi_m}(t, u)$ на підставі статистик, застосованих до відліків ПКВП через пробний період T_{pm} , при усередненні будуть змішуватися значення різних послідовностей і t_{0m} вже не буде спільною для всіх відліків фазою. За рахунок такого перемішування буде згладжуватися розмаїтість значень $m_{\xi_m}(t_{0m}/T_{pm})$ і лише за умови збігу пробного періоду та дійсного крива буде найбільш рельєфною. Відповідно за критерій вибору оцінки періоду корельованості з множини пробних його значень використано міру рельєфності кривої $\hat{m}_{\xi_m}(t_{0m}/T_{pm})$ як варіацію функції оцінювання цього математичного сподівання, яка за умови збігу пробного періоду із дійсним буде максимальною. Такий критерій називають критерієм максимуму функції варіації математичного сподівання та записують виразом

$$\hat{T}_m = \max_{T_{pm}} \text{Var} \left\{ \hat{m}_{\xi_m} \mid T_{pm} \in [T_{1m}, T_{2m}] \right\}, \quad (4)$$

де T_{pm} - пробний період ЕКС у межах m -го ковзного вікна із множини значень на інтервалі $T_{pm} \in [T_{1m}, T_{2m}]$.

Згідно з виразом (4) значенням періоду корельованості T_m слід вважати те із значень пробного періоду T_{pm} , котре забезпечує максимум функції варіації математичного сподівання m_{ξ_m} .

Маючи значення періоду корельованості T_{pm} на базі обґрунтованої математичної моделі (2) та синфазного методу (3), опрацьовано вибірки із реалізації ЕКС при фізичному навантаженні та отримано оцінки кореляційних компонент ЕКС для кожного m -го вікна. За інформативну ознаку, яка дасть змогу оцінити усю реалізацію ЕКС при фізичному навантаженні через сукупність оцінок кореляційних компонент $\hat{B}_{km}(u)$ m -их вибірок, використано оцінку математичного сподівання

$$M_k \left\{ M_u \left\{ \hat{B}_{km}(u) \right\} \right\} = \frac{1}{N_k} \frac{1}{N_u} \sum_{u=1}^{N_u} \sum_{k=1}^{N_k} \hat{B}_{km}(u), \quad u = \overline{1, N_u}, \quad k = \overline{1, N_k}. \quad (5)$$

де k – номер оцінки кореляційної компоненти ЕКС для m -го вікна; u – зсув; N_u – кількість зсувів; N_k – кількість компонент.

Використовуючи математичну модель та синфазний метод, розроблено формулу алгоритму для комп'ютерного опрацювання ЕКС при фізичному навантаженні, яка у символах алгебри алгоритмів зображена у вигляді

$$\begin{aligned}
& \Delta t; \zeta(m \Delta t); S, Sw \\
& ; \\
& \varphi(m \leq (S - Sw)) \\
& \begin{aligned}
& \overbrace{U_{\max}(m); NT(m) = \text{var}(Tp)} \\
& ; \\
& \varphi(Nk \leq (U_{\max}(m)/NT(m)) \\
& \varphi(n \leq NT(m)) ; \\
& \varphi(k1 \leq (Nk - 1)) \\
& \left(\begin{aligned}
& b_m(n, u) = b((n+u) + \zeta_m(n+k1 + ; c_{(n \leq NT(m)); (k1 \leq (Nk-1))} - ? \\
& + Nt(m)) * \zeta_m(n + (k1+u) * Nt(m)) \\
& ; \\
& c_{(k1 \leq (Nk-1))}; \\
& ; \\
& c_{(Nk \leq (U_{\max}(m)/NT(m))} \\
& ; \\
& (n \leq NT(m)) - ?
\end{aligned} \right. \\
& \overbrace{b(m, n, u) = b(m, n, u)/NT(m)} ; \quad \varphi(u \leq U_{\max}(m)) \\
& ; \quad \varphi(k \leq K) \\
& Nk \leq (U_{\max}(m)/NT(m)) - ? \quad \varphi(k1 \leq (Nk - 1)) \\
& \left(\begin{aligned}
& B(m, k+1, u) = B(m, k+1, u) + b(m, k+1, u) * ; \quad c_{(k \leq K); (k1 \leq (Nk-1))} - ? \\
& * \exp(-j * 2 * \pi * k * k1 / NT(m)); \\
& ; \\
& c_{(k1 \leq (Nk-1))} \\
& ; \\
& c_{(u \leq U_{\max}(m))} \\
& ; \\
& (k1 \leq (Nk-1)) - ?
\end{aligned} \right. \\
& ; \\
& \overbrace{B(m, k, u) = \text{abs}(b(m, n, u))/NT(m)} ; \quad c_{(m \leq (S - Sw))} \\
& ; \\
& (u \leq U_{\max}(m)) - ? \\
& ; \\
& M(M(B(m, k, u))) = \text{mean}(\text{mean}(B(m, k, u))) \\
& ; \\
& (m \leq (S - Sw)) - ?
\end{aligned}
\end{aligned}
\tag{6}$$

де $m = \overbrace{1; 2; 3; \dots; (S - Sw)}$, $u = \overbrace{u_0; u_1; u_2; \dots; U_{\max}(m)}$, $Nk = \overbrace{1; 2; 3; \dots; (U_{\max}(m)/NT(m))}$,
 $k1 = \overbrace{0; 1; 2; \dots; Nk - 1}$, $k = \overbrace{0; 1; 2; \dots; K}$, $n = \overbrace{1; 2; 3; \dots; NT}$;

$\zeta(t)$ – ЕКС при фізичному навантаженні; S_w – довжина ковзного вікна; m – кількість вікон; $NT(m)$ – період корельованості в m -му ковзному вікні; N_{km} – кількість кореляційних компонент; k – порядковий номер компоненти; N_{um} – максимальна довжина зсуву ковзного вікна; $b_m(n, u)$ – параметрична кореляція; $B_{km}(n)$ – кореляційні компоненти; K_m – кількість кореляційних компонент; N_{um} – максимальна довжина дискретного зсуву.

Розроблена формула алгоритму (6) засобами алгебри алгоритмів Овсяка В.К. на відміну від вербального та блок-схемного описів, забезпечує мінімізацію за кількістю дій та дослідження алгоритмів, дала змогу розробити програмне забезпечення для оцінювання статистичних характеристик ЕКС при фізичному навантаженні з метою виявлення нових в галузі кардіології інформативних ознак на основі математичної моделі у вигляді періодично корельованої випадкової послідовності.

У четвертому розділі на базі обґрунтованої математичної моделі та статистичного методу опрацювання ЕКС при фізичному навантаженні проведено експериментальні дослідження й отримано його інформативні ознаки. Розроблено алгоритм комп'ютерного імітаційного моделювання ЕКС при фізичному навантаженні. Результати аналізу ймовірнісних характеристик імітованого і натурального ЕКС верифікували коректність обґрунтованої математичної моделі та розробленого на її базі методу опрацювання.

Використовуючи алгоритм опрацювання ЕКС при фізичному навантаженні (вираз 6) отримано усереднені кореляційні компоненти для кожного m -го ковзного вікна.

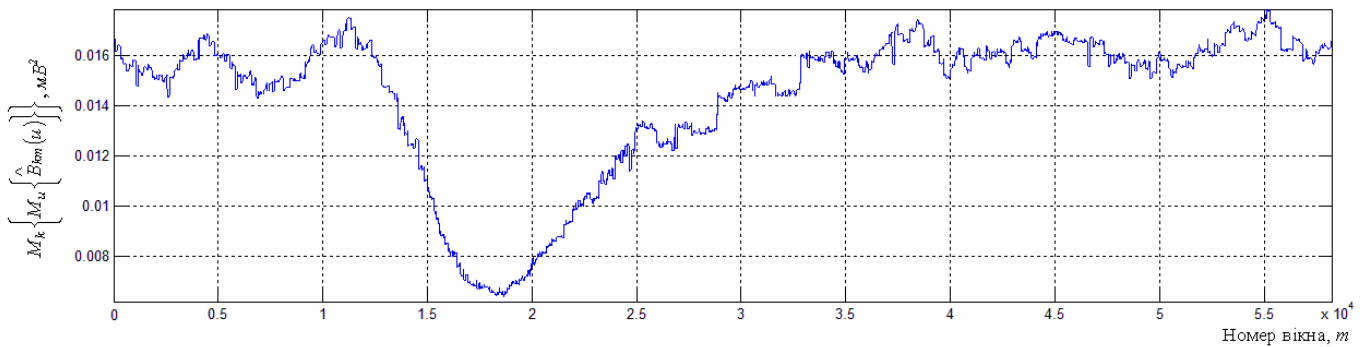


Рис. 5. Реалізація усереднених кореляційних компонент ЕКС

Усереднені оцінки кореляційних компонент (рис.5) характеризують зміну ЕКС, а саме його фазово-часові відхилення, що є важливим для задачі визначення часу відновлення після фізичного навантаження.

На цьому рисунку візуально бачимо зміну амплітудних значень оцінок усереднених кореляційних компонент ЕКС у межах m -ого ковзного вікна, що свідчить про чіткі прояви змін у ССС, які відбуваються під час виконання ФП Руф'є.

В результаті аналізу реалізації усереднених оцінок (рис.5) встановлено, що до початку фізичного навантаження оцінки змінюються в інтервалі від $[(m_1 - \sigma_1); (m_1 + \sigma_1)]$ із середнім рівнем (математичним сподіванням) m_1 . Якщо ці оцінки після фізичного навантаження наближаються за значенням в інтервалі $[(m_1 - \sigma_1); (m_1 + \sigma_1)]$ до оцінок перед навантаженням в інтервалі від t_0 до t_1 (рис.6), то стверджується, що стан ССС відновлюється, а максимальне наближення за значенням в n -ий момент часу t_n (на рис. 6 момент часу t_3), дає підставу для ствердження факту відновлення.

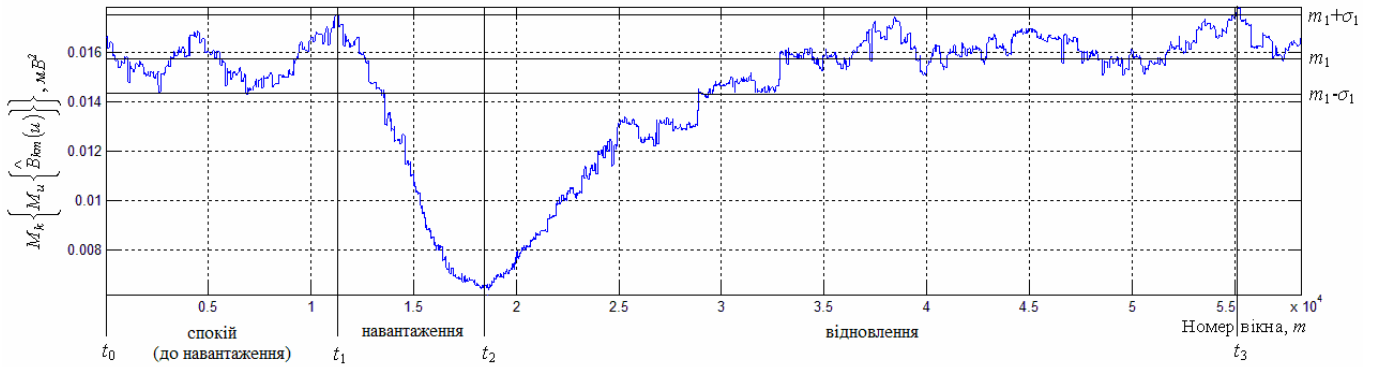


Рис. 6. Реалізація усереднених оцінок кореляційних компонент ЕКС із позначеними часовими станами

За традиційного припущення в таких ситуаціях значення оцінок кореляційних компонент в інтервалі від t_0 до t_1 (до навантаження – стан спокою) змінюються за нормальним законом розподілу, а задачу визначення часу (моменту) відновлення ССС після фізичного навантаження за усередненими кореляційними компонентами ЕКС зведено до задачі визначення максимальної ймовірності попадання миттєвого значення $m(t_n)$ в інтервал $[(m_1 - \sigma_1); (m_1 + \sigma_1)]$. На базі такого припущення розроблено формулу алгоритму для визначення часу відновлення із максимальною ймовірністю прийнятого рішення

$$\begin{aligned}
 & \overbrace{m(t); t_0; t_1; t_2; t_{\max}} \\
 & ; \\
 & m_1 = \text{mean}(m(t_0:t_1)) \\
 & ; \\
 & \sigma_1 = \text{std}(m(t_0:t_1)) \\
 & ; \\
 & \mathcal{Q}(t \leq t_{\max}) \\
 & \left(\begin{aligned} & p(m(t)) = (1/(\sigma_1 \sqrt{2\pi})) \cdot \exp(-(m(t)-m_1)^2 / (2\sigma_1^2)) \\ & ; \\ & \mathcal{C}(t \leq t_{\max}) \end{aligned} \right) \\
 & ; \\
 & p(m(t)) \rightarrow ; \quad \left(\begin{aligned} & p_{\max} = (1/(\sigma_1 \sqrt{2\pi})) \cdot \exp(-(m(t_2)-m_1)^2 / (2\sigma_1^2)) \\ & ; \end{aligned} \right) \quad (7) \\
 & ; \\
 & (t \leq t_{\max}) - ? \quad \left(\begin{aligned} & \mathcal{Q}(t \leq t_{\max}) \\ & \mathcal{Q}(i \leq (m_1 + \sigma_1)) \\ & \left(\begin{aligned} & p_{\text{temp}}(i) = p_{\text{temp}}(i) + (1/(\sigma_1 \sqrt{2\pi})) \cdot \exp(-(m(i)-m_1)^2 / (2\sigma_1^2)) \\ & ; \\ & \mathcal{C}(i \leq t_{\max}) \end{aligned} \right) \\ & \left(\begin{aligned} & p_{\max} = p_{\text{temp}}(i); (i \leq t_{\max}) - ? \\ & ; \\ & t_3 = i; \\ & ; \\ & \mathcal{C}(t \leq t_{\max}) \\ & ; \\ & (p_{\max} < p_{\text{temp}}) - ? \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) \quad \left(\begin{aligned} & p_{\max} \rightarrow ; (t \leq t_{\max}) - ? \\ & ; \\ & (t_3 - t_2) \rightarrow \end{aligned} \right)
 \end{aligned}$$

де $t \in t_0; t_1; t_2; \dots; t_{\max}$, $i \in m_1 - \sigma_1; (m_1 - \sigma_1) + \Delta t \dots; m_1 + \sigma_1$.

Для верифікації математичної моделі та методу статистичного опрацювання ЕКС при фізичному навантаженні розроблено імітаційну модель у вигляді:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^{N_k} \left\{ \sum_{n=1}^{M_n} \begin{cases} (A_{nk} + \psi_A) \sin(2 \cdot \pi \cdot (t + \psi_T) \cdot f_{nk}) \cdot e^{-t \cdot K_{nk}} \cdot L_{nk}, & t \in [T_{(n-1)k}, T_{nk}) \\ 0, & t \notin [T_{(n-1)k}, T_{nk}) \end{cases}, t \in [T_{k-1}, T_k) \right\} \quad (8)$$

$$, \quad t \notin [T_{k-1}, T_k)$$

де N_k - кількість періодів ЕКС; M_n - кількість хвиль ЕКС у межах k -го періоду; T_k - тривалість k -го періоду T_k ; T_{nk} - тривалість n -ої хвилі на k -му періоді; A_{nk} - амплітуда nk -ої хвилі; f_{nk} - частоти коливань синусоїд (у даному випадку для півперіоду); K_{nk} - коефіцієнти нахилу nk -ої хвилі; L_{nk} - масштабні коефіцієнти для nk -ої хвилі; $\psi_{A_{nk}}(M(A_{nk}), D(A_{nk}))$ і $\psi_{T_{nk}}(M(T_{x_{nk}}), D(T_{x_{nk}}))$ - випадкові величини для амплітуд і тривалостей часових n -ої хвилі на k -му періоді, розподілених за нормальних законом із математичним сподіваннями $M\{A\} = M(T_{x_{nk}}) = 0$ та дисперсіями $D\{A_{nk}\}$, $D(T_{x_{nk}})$.

Використовуючи вираз (8) та програмне забезпечення у середовищі MATLAB 2011a, розроблено імітаційну модель ЕКС при фізичному навантаженні з метою верифікації розробленого статистичного методу опрацювання.

Реалізацію зімітованого ЕКС при фізичному навантаженні зображено на рис.7.

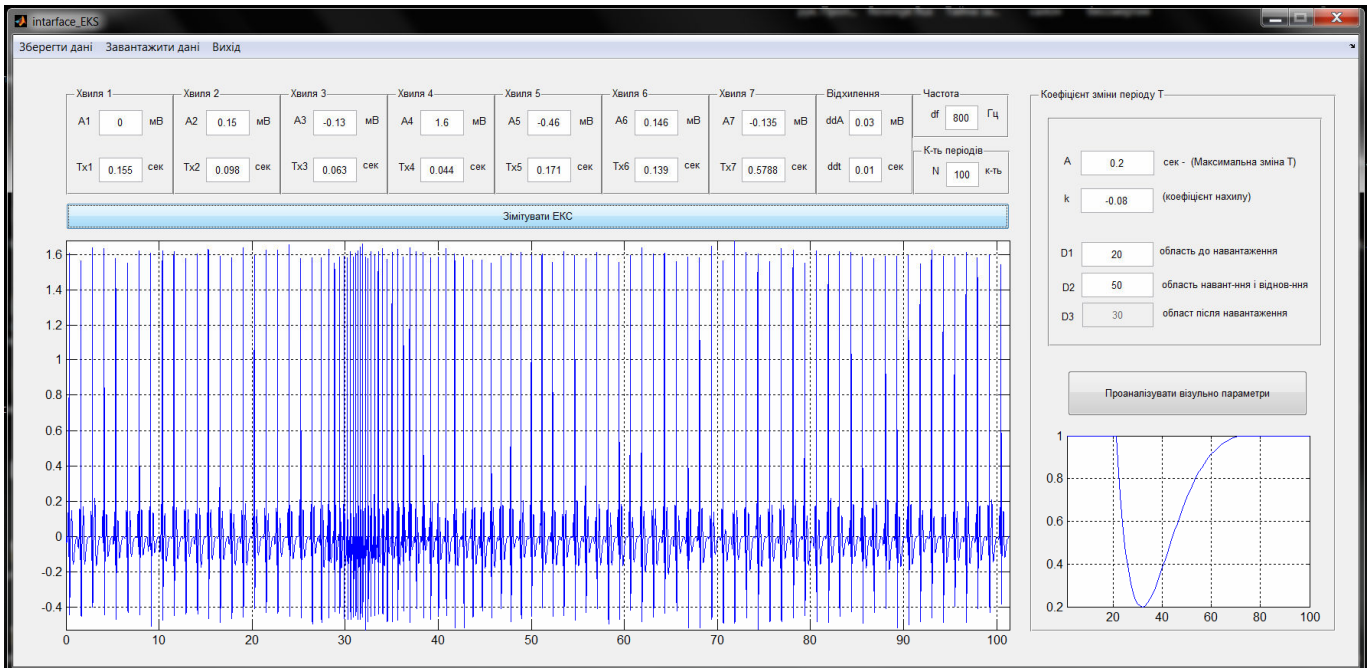


Рис. 7. Реалізація зімітованого ЕКС при фізичному навантаженні (апріорні дані - $t_1=75$ сек, $t_2=25$ сек, $t_3=45$ сек)

Використовуючи розроблені формули алгоритмів (6) і (7), визначено час відновлення із максимальною ймовірністю прийнятого рішення (рис.8).

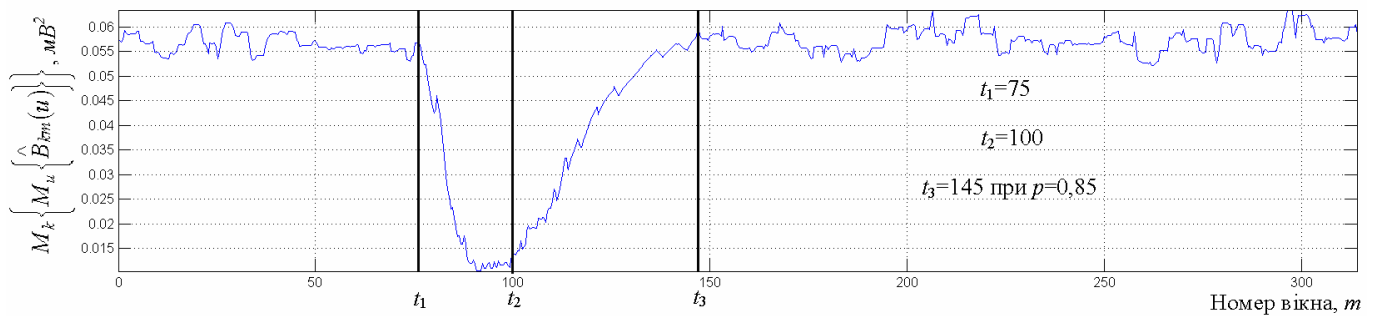


Рис. 8. Реалізація усереднених оцінок кореляційних компонент зімітованого ЕКС із позначеними часовими зонами

Отриманий результат (рис.8) свідчить про високу ймовірність порядку 0,89 визначення часу t_3 апіорного по відносно до апостеріорного.

В таблиці 1 наведено 10 результатів обчислення часу відновлення для 10-ти реалізацій з імітованих ЕКС із вказанням ймовірностей прийнятих рішень.

Таблиця 1

Результати обчислених значень моменту часу відновлення та ймовірності вірно прийнятого рішення

№	Апіорний час $t_{3 \text{ apriore}}$	Апостеріорний час $t_{3 \text{ aposteriory}}$	Ймовірність вірно прийнятого рішення
1	180	181	0,89
2	185	183	0,92
3	190	192	0,95
4	195	193	0,87
5	200	204	0,89
6	205	210	0,88
7	210	212	0,91
8	215	219	0,93
9	220	225	0,90
10	225	225	0,97

Із обчислених значень ймовірностей (табл. 1) бачимо, що максимальне значення відносної похибки між значеннями апостеріорних $t_{3 \text{ aposteriory}}$ та апіорних $t_{3 \text{ apriore}}$ часів становить 2,72% при ймовірності прийнятого рішення 0,9, що свідчить про високу точність методу визначення часу відновлення ССС за ЕКС. Даний факт є підставою для верифікації методу опрацювання ЕКС при фізичному навантаженні.

У **додатках** наведено тексти програм, розроблені для ПК (ОС Windows 7), акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу обґрунтування математичної моделі та розроблення методу статистичного опрацювання електрокардіосигналу при фізичному навантаженні, сформованого на базі цієї моделі, для підвищення точності кардіодіагностичних систем, зорієнтованих на

визначення показників стану серцево-судинної системи людини та адаптивності її організму до змін середовища.

При цьому отримано такі основні результати:

1. На підставі проведеного порівняльного аналізу відомих математичних моделей електрокардіосигналу, зареєстрованого при фізичному навантаженні, сформульовано основні вимоги до математичної моделі: можливість опису коливання у часі, засоби для опису нестационарних коливань з урахуванням поєднання властивостей періодичності й випадковості серцевих циклів при фізичному навантаженні.
2. Вперше обґрунтовано використання математичної моделі електрокардіосигналу у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, яка на відміну від відомих враховує як періодичний перехідний характер, так і стохастичність структури електрокардіосигналу при фізичних навантаженнях.
3. Удосконалено метод опрацювання та розроблено алгоритм опрацювання електрокардіосигналу з використанням засобів енергетичної теорії стохастичних сигналів, які дають змогу оцінити стан серцево-судинної системи при фізичних навантаженнях на ранніх стадіях захворювання.
4. Установлено, що отримані значення усереднених кореляційних компонент є інформативно-інваріантними ознаками електрокардіосигналу, за значеннями яких з ймовірністю прийнятого рішення 0,9 можна оцінити функціональний стан серцево-судинної системи при фізичному навантаженні, зокрема виявити час відновлення стану серця при фізичному навантаженні з точністю 2,72%.
5. Вперше розроблено комп'ютерну імітаційну модель електрокардіосигналу при фізичному навантаженні на базі обґрунтованої математичної моделі для потреб верифікації й тестування розробленого методу опрацювання електрокардіосигналу.
6. Розроблено пакет комп'ютерних програм статистичного опрацювання електрокардіосигналу, придатний для використання як складової спеціалізованого програмного забезпечення кардіодіагностичних систем для визначення стану серцево-судинної системи людини.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дунець, В.Л. Обґрунтування адекватності математичної моделі електрокардіосигналу для задачі виявлення патології [Текст] / В.Л.Дунець, Я.П.Драган, Г.М.Осухівська // Вісник Хмельницького національного технологічного університету. – Хмельницький: ХНУ. – 2007. - № 2. С. 99-102.
2. Дунець, В.Л. Опрацювання електрокардіосигналу синфазним методом для виявлення патології [Текст] / В.Л.Дунець, Я.П.Драган // Комп'ютерні технології друкарства. – Львів: Українська академія друкарства. – 2007. – № 18. – С. 51-59.
3. Імітаційна модель електрокардіосигналу [Текст] / Л.Є.Дедів, В.Л.Дунець, М.О.Хвостівський, О.В.Гевко // Міжвузівський збірник „Наукові нотатки” Луцького державного технічного університету – Луцьк: ЛДТУ. – 2008. - №21.-С. 83-88.

4. Імітаційна модель електрокардіосигналу на основі періодично корельованого випадкового процесу [Текст] / Л.Є.Дедів, М.О.Хвостівський, В.Л.Дунець, Г.М.Шадріна // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ ім. І.Пулля. – 2008. – №3. – С. 201-205.
5. Метод комп'ютерного опрацювання електрокардіосигналу під впливом дозованого фізичного навантаження [Текст] / О.В.Гевко, В.Л. Дунець, М.О. Хвостівський, Є.Б. Яворська // Вісник Харківського національного університету. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління», - 2010. – №926. – С. 93-99.
6. Дунець, В.Л. Стохастична модель електрокардіосигналу для задачі діагностики стану серця під час фізичного навантаження [Текст] / В.Л.Дунець // Вісник національного університету «Львівська політехніка». - Львів: Видавництво Львівської політехніки. - 2011. - № 694. - С. 260-265.
7. Дунець, В.Л. Системно-сигнальна концепція – підстава статистичного визначення стану ритміки серцево-судинної системи як стохастичного коливного об'єкта [Текст] / Я.П.Драган, В.Л.Дунець // Вісник національного університету «Львівська політехніка». - Львів: Видавництво Львівської політехніки. - 2011. - № 710. - С. 256-262.
8. Дунець, В.Л. Визначення типу електрокардіосигналу [Текст] / В.Л.Дунець, Я.П.Драган // Матеріали дев'ятої науково-технічної конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя 12-13 травня 2005р. – Тернопіль: ТДТУ, 2005. – С. 87.
9. Дунець, В.Л. Метод фільтрації електрокардіосигналу [Текст] / В.Л.Дунець // Матеріали десятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулля 17-18 травня 2006р. – Тернопіль: ТДТУ, 2006. – С. 117.
10. Дунець, В.Л. Адекватність математичної моделі електрокардіосигналу для задачі виявлення патології у вигляді періодично корельованого випадкового процесу [Текст] / В.Л. Дунець // Матеріали одинадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя 16-17 травня 2007 р. – Тернопіль: ТДТУ, 2007. – С. 17.
11. Дунець, В.Л. Комп'ютерний аналіз електрокардіосигналу компонентним методом для виявлення патології [Текст] / В.Л.Дунець, Л.Є.Дедів, Г.М.Осухівська // Теоретичні та прикладні аспекти побудови програмних систем ТАAPSD'2008: тези доповідей п'ятої міжнародної конференції, 22-26 вересня 2008 р. – Київ-Чернігів: КМА, ЧДТУ 2008. – С.120-125.
12. Дунець, В.Л. Імітаційна модель електрокардіосигналу [Текст] / Л.Є.Дедів, В.Л.Дунець, Т.Легкий // Матеріали дванадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулля 14-15 травня 2008 р. – Тернопіль: ТДТУ, 2008. – С. 11.
13. Дунець, В.Л. Метод виявлення змін стану серцево-судинної системи під впливом фізичних навантажень [Текст] / В.Л.Дунець, О.В.Гевко // Матеріали всеукраїнської наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя 13-14 травня 2009р. – Тернопіль: ТДТУ, 2009. – С. 14.

14. Дунець, В.Л. Комп'ютерне імітаційне моделювання електрокардіосигналу [Текст] / В.Л.Дунець, М.О.Хвостівський, Г.М.Шадріна [Текст] // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 50 річчю ТНТУ та 165 річчю з дня народження Івана Пулюя, 19-21 травня 2010р. – Тернопіль: ТНТУ, 2010. – С. 432, 433.
15. Застосування енергетичної теорії стохастичних сигналів для задач медичної діагностики / В.Л.Дунець, В.Г.Дозорський Л.Є.Дедів, І.Ю.Дедів [Текст] // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований, 2011». Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2011. – Т.3. – С. 72, 73.

АНОТАЦІЯ

Дунець В.Л. Математична модель та метод опрацювання електрокардіосигналу при фізичному навантаженні для підвищення точності кардіодіагностичних систем. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 — математичне моделювання та обчислювальні методи. — Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2013 р.

У дисертаційній роботі розв'язано важливе наукове завдання – обґрунтування адекватної математичної моделі та методу статистичного опрацювання електрокардіосигналу при фізичних навантаженнях для підвищення точності кардіодіагностичних систем.

Обґрунтовано нове застосування періодично корельованого випадкового процесу як математичної моделі електрокардіосигналу при фізичному навантаженні, яка враховує у своїй структурі поєднання властивостей періодичності зі стохастичністю. Математична модель враховує як нестационарний (перехідний) характер, так і стохастичність електрокардіосигналу при фізичних навантаженнях. На базі обґрунтованої моделі розроблено метод статистичного опрацювання електрокардіосигналу при фізичному навантаженні. Використовуючи метод статистичної теорії вибору рішень, запропоновано нові діагностичні ознаки для діагностики адаптивно-регулятивних можливостей організму людини: потужність відхилень ЕКС у вигляді кореляційних компонент усереднених по часових зсувах, що свідчить про чіткі прояви змін, які відбуваються в серці при фізичному навантаженні.

Розроблено метод імітаційного моделювання. Створено пакет комп'ютерних програм для автоматизованого опрацювання електрокардіосигналу та проведення імітаційних експериментів тестування кардіодіагностичних систем.

Ключові слова: електрокардіосигнал, періодично корельований випадковий процес, кореляційні компоненти, точність, верифікація, комп'ютерне імітаційне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Дунец В.Л. Математическая модель и метод обработки электрокардиосигнала при физической нагрузке для повышения точности кардиодиагностических систем. — Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук за специальностью 01.05.02 — математическое моделирование и вычислительные методы. — Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2013 г.

В диссертационной работе решено важное научное задание – обоснование адекватной математической модели и метода статистической обработки электрокардиосигнала при физической нагрузке для определения адаптивно-регулятивных возможностей сердечно-сосудистой системы.

Обосновано представление электрокардиосигнала в виде скользящих окон, что обеспечило возможность учесть взаимно-корреляционные связи между различными состояниями сердечно-сосудистой системы (состояние покоя, физической нагрузки, восстановления). Учитывая сложность формирования электрокардиосигнала, проанализированы его характеристики в рамках детерминированного подхода и с позиций стохастического подхода (методами теории стационарных случайных процессов). Полученные результаты анализа методами гармонического анализа в рамках детерминированного подхода подтверждают, что найденные амплитудные спектры электрокардиосигнала являются переменчивыми, то-есть содержат определенную случайность. Случайная стационарная модель отображает сложность электрокардиосигнала в спектральном распределении мощности, однако не отображает его фазово-часовой структуры, которая является важным показателем при выявлении часовых изменений в сигнале. Из анализа свойств вероятностных характеристик электрокардиосигнала и свойств периодически коррелируемых случайных процессов вытекает, что математическая модель процесса такого класса дает возможность адекватно описать сигнал, а именно, учесть наличие в его структуре сочетание свойств периодичности из стохастичностью, что является важным при исследовании фазово-часовых отклонений с целью выявления момента проявления изменений в функционировании сердечно-сосудистой системы. На базе математической модели электрокардиосигнала в виде периодически коррелируемого случайного процесса обоснованно использование спектрально-корреляционного метода для получения информативных признаков электрокардиосигнала путем применения синфазного метода анализа. Разработанный метод компьютерной обработки электрокардиосигнала, который дал возможность увеличить точность диагностики путем внедрения в область кардиологии нового класса информативно-достоверных признаков – стационарные компоненты, которые характеризуют изменения фазово-часовой структуры сигнала, и этим дают возможность обнаружить нарушение в работе сердца человека. Применены методы статистической теории принятия решений для определения достоверности результатов оценивания корреляционных компонент электрокардиосигнала, в частности для оценивания времени восстановления сердечно-сосудистой системы после физической нагрузки. Результаты оценивания

достоверности подтвердили актуальность использования корреляционных компонент электрокардиосигнала как инвариантно информативных признаков, с помощью которых можно оценить состояние сердечно-сосудистой системы.

Разработан метод компьютерного имитационного моделирования электрокардиосигнала на основе периодически коррелируемой случайной последовательности для потребностей тестирования разработанных алгоритмов его обработки. Проведено исследование вероятностных характеристик имитированных реализаций электрокардиосигнала, что дало возможность подтвердить соответствие статистического метода обработки электрокардиосигнала при физической нагрузке.

Создан пакет компьютерных программ для автоматизированной обработки электрокардиосигнала при физической нагрузке и проведения имитационных экспериментов для автоматизированных кардиодиагностических систем.

Ключевые слова: электрокардиосигнал, периодически коррелированный случайный процесс, корреляционных компоненты, точность, верификация, компьютерное имитационное моделирование.

SUMMARY

Dunet V.L. Mathematical model and method processing of electrocardiosignal is at the physical loading for the increase of exactness of the kardiosystem. - Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineerings sciences after speciality 01.05.02 - mathematical design and calculable methods. - Ternopil national technical university of the name of Ivan Ivan Puluy, Ternopil, 2013.

In dissertation work an important scientific task - ground of adequate mathematical model and method of the statistical working of electrocardiosignal is untied at the physical loading for the increase of exactness of the kardiosystems.

Grounded new application of the periodically correlated random process as tu the mathematical model of electrocardiosignal at physical loaded, what takes into account in the structure combination of properties of periodicity with a stochastic. A mathematical model takes into account both non-stationary (transitional) character and stochastic of electrocardiosignal at the physical loading On the base of reasonable model the method of the statistical working of електрокардіосигналу is worked out at the physical loading. Using the method of statistical theory of choice of decisions, new diagnostic signs are offered for diagnostics of adaptive-regulatory possibilities of organism of man: power of rejections EKS as spectral component average on sentinel changes, that testifies to the clear displays of changes which take place in a heart at the physical loading.

A simulation technique is worked out. The package of computer softwares is created for the automated working of electrocardiosignal and realization of imitation experiments for diagnostic of the kardiosystems.

Keywords: electrocardiosignal, periodically correlated random process, correlated components, exactness, verification, computer imitation modeling.

