

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

ПАЛЯНИЦЯ ЮРІЙ БОГДАНОВИЧ

УДК 57.087:519.21

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ
ФОНОКАРДІОСИГНАЛУ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ
КАРДІОДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Драган Ярослав Петрович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри програмного забезпечення.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Власюк Анатолій Павлович
Національний університет «Острозька академія»,
завідувач кафедри економіко-математичного
моделювання та інформаційних технологій, м. Острог;

доктор технічних наук, професор
Овсяк Володимир Казимирович
Українська академія друкарства
професор кафедри автоматизації та комп'ютерних
технологій, м. Львів.

Захист відбудеться «31» травня 2019 р. о 11.00 год на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, 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 розісланий «30» квітня 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б. Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У кардіологічній практиці все більшого поширення набувають системи віддаленого моніторингу (телемедицина) стану серцево-судинної системи людини (ССС), що суттєво полегшує роботу лікарів-кардіологів. Цей факт вимагає постійного розвитку та ефективного використання методів обчислювальної математики, покладених в основу алгоритмів роботи таких систем з метою удосконалення та підвищення ефективності їх. Особливо актуальним є моніторинг стану здоров'я людини за межами стаціонару на ранній (донозологічній) стадії, що забезпечується використанням портативної апаратури носимої на тілі пацієнта. При цьому в сфері профілактичної медицини системи широко використовують метод полікардіографії, який базується на одночасному записі електрокардіограми (ЕКГ), фонокардіограми, сфігмограми. Зокрема, підходи до опрацювання фонокардіосигналу (ФКС) пройшли такі етапи еволюції: морфологічний аналіз, детерміністичний підхід (Кебот, Додж, Мангеймер, Касирський) та базові статистики. Врахувати нестационарну природу біосигналу дає змогу стохастичний підхід (Schmidt), а статистичну взаємопов'язаність між окремими циклами серцевих скорочень – математична модель у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (Я. П. Драган). Зasadничу роль при цьому відіграє метод пошуку періоду корельованості біосигналу, який залежить від попередньої підготовки його до опрацювання та відповідних тактик формалізації задачі.

Серцево-судинну систему людини доцільно розглядати як замкнуту гемодинамічну (Р. М. Баєвський, А. А. Талаков), де первинним переносником відомостей про неї є фонокардіосигнал. При цьому, енергія процесу серцевих скорочень єдиного генезу розділяється в просторо-часі на два нестационарні «потоки» різної фізичної природи: електричну (електрокардіосигнал (ЕКС)) та механічну (фонокардіосигнал). Кожен наступний цикл серцевих скорочень відбувається у відповідь на потенціал дії «водія ритму» – синусового вузла, що відображається на електрокардіограмі у вигляді Р-зубця і зумовлює необхідність використання електрокардіосигналу як джерела доповняльних відомостей і відповідає природі досліджуваного об'єкта (Котельников).

Програмна реалізація алгоритмів опрацювання цими методами інтегрована в сучасні системи діагностики стану ССС необхідна для оперативного та своєчасного виявлення змін на ранніх стадіях патологічного процесу, який жодним чином себе не проявляє явно, що значно розширить можливості сучасних діагностичних систем.

Тому актуальним науковим завданням є обґрунтування математичної моделі ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС з урахуванням періодичності його формування та статистичних взаємозв'язків адекватної природі досліджуваного об'єкта та отримання нових інформативно-інваріантних ознак завдяки оптимізації відбору статистичного матеріалу для застосування відповідних моделі методів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з науковою темою, яку виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя на кафедрі «Біомедичних систем»: «Методи та засоби виявлення патологічних станів для систем медичного контролю

функціонального стану організму людини», інвентарний номер державної реєстрації № 0115U002455, 2015–2017 рр. – обґрунтування математичної моделі та розроблення методу опрацювання фонокардіосигналу засобами енергетичної теорії стохастичних сигналів.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є удосконалення математичної моделі ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС, яка враховує притаманні сигналіві повторюваність і випадковість, та розроблення методів аналізу його, які базуються на цій моделі, для підвищення достовірності автоматизованих діагностичних систем (у тому числі й віддаленої діагностики). Досягнення мети вимагає розв'язання таких задач:

1. Проаналізувати відомі математичні моделі фонокардіосигналу та методів його опрацювання для обґрунтування напрямку дослідження;

2. Удосконалити математичну модель фонокардіосигналу, яка враховує у своїй структурі фазово-часові характеристики сигналу та механізм генезу ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС, для розв'язання задач оперативного та достовірного виявлення змін стану серця на ранніх стадіях захворювання;

3. Обґрунтувати метод статистичного опрацювання та комп'ютерного імітаційного моделювання фонокардіосигналу з метою виявлення нових інформативних та інваріантних ознак;

4. Обґрунтувати можливість застосування цих нових інформативних ознак в автоматизованих системах комп'ютерної діагностики;

5. Розробити програмне забезпечення комп'ютерного дослідження фонокардіосигналу для верифікації обґрунтованої математичної моделі.

Об'єкт дослідження: Процес моделювання ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС з урахуванням механізму його формування та статистичних взаємозв'язків між окремими реалізаціями його.

Предмет дослідження: Математична модель ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС у вигляді періодично корельованого випадкового процесу та її властивостей для підвищення достовірності систем автоматизованої діагностики.

Методи дослідження У дослідженні використано синфазний метод аналізу експериментальних даних засобами моделі у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, що враховує повторюваність та випадковість, властиву ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС (надалі ФКС), статистичну взаємопов'язаність між різними серцевими циклами, локалізацію змін в часі та розроблено метод комп'ютерного імітаційного моделювання ФКС на основі обґрунтованої математичної моделі. Створено пакет прикладних програм, де імплементовано алгоритми опрацювання ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше обґрунтовано математичну модель фонокардіосигналу одночасно зареєстрованого з електрокардіосигналом у вигляді періодично-корельованої випадкової послідовності, що дало можливість розроблення алгоритмів опрацювання та автоматизацію аналізу нестационарного фонокардіосигналу та підвищити достовірність результатів аналізу.

2. Вдосконалено синфазний метод опрацювання фонокардіосигналу, що дало змогу отримати нові інформативно-інваріантні діагностичні ознаки.

3. Вперше обґрунтовано застосування спектрально-кореляційних компонент, які відповідають стану серцево-судинної системи людини для аналізу фонокардіосигналу, базуючись на концепціях бімедійності та «шунтування».

4. Вперше розроблено імітаційну модель фонокардіосигналу, яка підтвердила узгодження результатів комп'ютерного експерименту з емпіричними даними.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані теоретичні результати обґрунтовують модифікацію відомих спектрально-кореляційних методів аналізу характеристик ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС, дають змогу підвищити достовірність та розширити можливості автоматизованих систем діагностики шляхом впровадження в область кардіології нового класу достовірних інформативно-інваріантних ознак, що ними в цьому сенсі є спектральні компоненти. Побудована комп'ютерна імітаційна модель ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС придатна для тестування алгоритмів опрацювання даних, отриманих у лікувальних установах. Результати дисертаційного дослідження надаються для застосування при виконанні наукових досліджень, їх впроваджено: в Тернопільській міській комунальній лікарні «МКЛ № 3»; в навчальному процесі кафедри медичної інформатики, кафедри медичної фізики та кафедри фізіології з основами біоетики та біобезпеки Тернопільського державного медичного університету імені І. Я. Горбачевського; в навчальному процесі на кафедрі біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені І. Пулюя.

Особистий внесок. Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані дисертантом самостійно. У працях, опублікованих із співавторами, здобувачеві належить: у роботі [1] – поширення умов застосовності методів статистики 2-го порядку на аналіз фонокардіосигналу одночасно зареєстрованого з електрокардіосигналом; [2] – поширення концепції одержання відомостей про стан біооб'єкта як енергактивної системи шляхом активного зондування; у роботах [4] – обґрунтування структури апаратних засобів досягнення однорідності статистичного матеріалу для діагностики адаптаційних резервів серця; [5] – поширення концепції одержання відомостей про стан біооб'єкта як емерджентної енергактивної системи; [6] – верифікація результатів дослідження; [7] – застосування принципів бімедійності та шунтування до гемодинамічної системи з внутрішнім активатором; [8] – вибір оптимальних параметрів алгоритму попереднього опрацювання фонокардіосигналу з урахуванням генезу його; [9] – обґрунтування структури системи дистанційної діагностики адаптаційних резервів серця.

Апробація результатів дисертації. Окремі результати роботи апробовано на: Міжнародному науковому симпозиумі «Досягнення сучасної науки» (19–30 червня 2012 р. – Іваново, РФ); XVII-му науково-технічному форумі «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков: ХНУРЭ. 2013; Міжнародній науково-практичній конференції «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2013» (5–6 червня 2013 р. – Іваново, РФ); Міжнародній науково-практичній конференції «Perspective innovations in science, education, production and transport 2014» (16–26 грудня 2014 р. – Іваново,

РФ); Міжнародній конференції 1st International Conference (AICT'2015), October 29 – November 1, 2015, Lviv, Ukraine. – Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2015; IV науково-технічній конференції «Обчислювальні методи і системи перетворення інформації» Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2016 р. – Лівів; неодноразово на конференціях Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (2012–2017 рр.); щорічних наукових семінарах кафедри «Біотехнічні системи» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (2012–2015 рр.).

В цілому робота доповідалася на науковому семінарі Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів), в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (м. Тернопіль).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових праць: 6 статей у наукових фахових виданнях [1-5,8], 5 з них [1,3-5,8] індексуються в наукометричній базі «Index Copernicus», 2 статті у закордонних виданнях [6-7], 1 патент України на корисну модель, 10-х збірниках тез наукових конференцій [10-20]. Працю [3] опубліковано без співавторів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 164 сторінки, з яких 120 сторінок основного тексту 4 додатків на 15 сторінках, список літератури налічує 131 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету та завдання, наведено об'єкт, предмет та методи дослідження, визначено наукову новизну, практичне значення й особистий внесок дисертанта, подано відомості про апробацію і впровадження результатів дослідження.

У першому розділі описано специфіку задачі та сучасний стан проблеми діагностування серцево-судинної системи людини за допомогою фонокардіографії, окреслено умови проведення експериментального дослідження, а також наведено типову схему відбору сигналу і обґрунтовано вимоги до системи дистанційного моніторингу стану серцево-судинної системи пацієнта.

Існуючі на сьогоднішній день у медицині діагностичні системи широко використовують метод полікардіографії, який базується на одночасному записі електрокардіограми (ЕКГ), фонокардіограми (ФКГ) та сфігмограми. Повну інформацію про стан серцево-судинної системи (ССС) можна отримати лише за умови одночасного використання декількох методів діагностування її патологій. На переваги комплексного підходу вказували ряд авторів наукових праць: М. А. Куршаков, П. Е. Лукомський, С. А. Лупенко, А. А. Селідовкіна.

Завдяки розвитку технологій та, зокрема, комп'ютерної техніки, метод фонокардіографії здобув поширення в системах автоматизованої комп'ютерної діагностики, які вимагають застосування та постійного вдосконалення математичного апарату та обчислювальних алгоритмів, врахування нових факторів,

що чинять вплив на здоров'я людини. Алгоритми роботи таких діагностичних систем визначаються математичною моделлю ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС. Відомі математичні моделі можна умовно розділити на детерміновані (Кебот і Додж(1925), Мангеймер (1941), Г. І. Касирським(1957)) та стохастичні (Г. М. Осухівська – тоновий сигнал, статистичний підхід; С. А. Лупенко – підхід до опису кардіосигналів у вигляді суперпозиції координат скінченновимірною вектора циклічних ритмічно пов'язаних випадкових процесів як математичних моделей одночасно зареєстрованих кардіосигналів; S. Schmidt – прихована марківська модель. У діагностичних системах СФЕРА-4 (НТЦ «ХАІ-МЕДИКА, Харків), «Кардіо +» («МЕТЕСОЛ», Чернігів), МКМ-08 (СФУ, Красноярськ, Росія) опрацювання даних базується на поданні ФКС як стаціонарної випадкової послідовності. При оцінюванні імовірнісних характеристик ФКС за математичну модель приймають стаціонарний випадковий процес. Такий підхід є спрощеним, не відповідає природі процесу серцевих скорочень і не має засобів оцінювання статистичної взаємопов'язаності між різними циклами серцевих скорочень, а також властивих ФКС повторюваності та випадковості, тож не може бути використаний для своєчасного виявлення проявів захворювання.

Фонокардіографія реєструє тони, шуми, що виникають при роботі серця. Серцеві м'язи, клапани, великі судини, що підходять до серця, потік крові є причинами появи комплексу механічних коливань, що призводить до появи шумів різної частоти і тонів із діапазоном 140-1000 Гц. Фонокардіографічний метод об'єктивізує дані про тони і шуми серця, уможливорює розрахунок інформативних показників, дає змогу спостерігати за динамікою зміни звуків серця у зв'язку з перебігом патологічних процесів.

Провідна система серця включає в себе сино-атріальний (синусів) вузол, атріо-вентрикулярний вузол, пучок Гіса (His W), ніжки пучка Гіса, волокна Пуркінє (Purkinje JP), пучки Самойлова-Венкебаха. Головним водієм ритму є синусів вузол (Й. Шмидт-Фойгт (1966)), який генерує збудження (Keitx A., Flack M. W., Aschoff K. A., Tawara S., Harrison D. C., Schroeder J. S., Berke O. K., Graham A. F., Rider A. K., Stinson E. B.), що, в свою чергу, поширюється по структурах провідної системи, спричиняючи послідовне скорочення ділянок міокарда та, відповідно, їх послідовне розслаблення (систола/діастола).

Частота серцевих скорочень (ЧСС) визначається автоматизмом синусового вузла, який модулюється шляхом зворотного зв'язку впливом вегетативних, гуморальних і місцевих факторів. Тому, роботу серця можна описати «модуляцією» – кожен з послідовних імпульсів потенціалу дії спричиняє відповідь у вигляді серії послідовних рознесених в часі серцевих скорочень/розслаблень, при цьому форма, тривалість і фазові зсуви цих імпульсів можуть змінюватися в залежності від ступеня навантаження, емоційного стану та цілого комплексу інших екзогенних та ендогенних впливів. Відгуки також не будуть мати постійних параметрів, які, в свою чергу, будуть залежати від таких факторів, як стан провідної системи (блокада ніжки пучка Гіса), опору структур потоку крові (пролапси, стенози, аневризми), постінфарктних рубців і ще багато інших факторів, що має велику діагностичну цінність.

Опираючись на міркування викладені у праці Р. М. Баєвський, А. А. Талаков «Балістокардіографія» стосовно того, що серцево-судинну систему людини доцільно розглядати як замкнуту гемодинамічну, де первинним переносником відомостей про неї, з-поміж інших, є фонокардіосигнал як такий, що породжений механічними та акустичними процесами в системі, для одержання додаткових (часто критичних) відомостей для підвищення достовірності оцінювання параметрів досліджуваного об'єкта та принципу бімедійності, а саме розділення енергії сигналу, породженого одним джерелом, в просторо-часі на два «потоки» різної фізичної природи (електричну та механічну) введено поняття «шунтування». Під шунтуванням розуміємо принцип одержання доповняльних відомостей про об'єкт «обхідним» «коротким» шляхом, зокрема через виділення окремих інформативних параметрів із сигналу іншої фізичної (електричної, на відміну від акустичної) природи процесу того ж генезу в термінах сигнально-системної концепції.

Розв'язання сформульованих у дисертації задач складає значний внесок у вирішення актуального, практично важливого наукового завдання – удосконалення математичного моделювання фонокардіосигналів та методів автоматичного опрацювання з урахуванням їх нестационарності для визначення характеристик серцевої діяльності з прогнозованою достовірністю.

Другий розділ стосується вибору напрямку дослідження, обґрунтовано основні аспекти математичного моделювання стохастичного, нестационарного за природою ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС засобами ЕТСС та розроблено принцип попередньої підготовки ФКС для опрацювання його.

Математична модель ФКС як ПКВП зображується у вигляді:

$$\xi(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} \xi_k(t) \cdot e^{ik \frac{2\pi}{T} t}, t \in \mathbf{R}, \quad (1)$$

де $\xi_k(t)$ – стаціонарні компоненти фонокардіосигналу як стохастична складова сигналу; $e^{ik \frac{2\pi}{T} t}$ – періодична складова фонокардіосигналу із періодом корельованості T .

Математична модель ФКС як ПКВП обґрунтовує застосовність відповідних методів статистичного опрацювання сигналу (синфазний, компонентний, фільтровий). Статистичне опрацювання даних синфазним методом вимагає мінімуму апаратних та обчислювальних ресурсів та передбачає визначення періоду корельованості щоб сформувати ансамбль реалізацій відібраного сигналу з метою його подальшої обробки (рис. 1). Класичним підходом до визначення його є обчислення періоду повторюваності автокореляційної функції (рис. 2). Такий спосіб є чутливим до довжини вибірки та фазової структури серцевого циклу, що унеможливорює забезпечення повторюваності результатів. Визначення тривалості одного серцевого циклу за тривалістю R-R інтервалу не дає змоги забезпечити вибірку однієї реалізації, тобто інтервалу між моментами прояву дії синусового вузла, що на ЕКГ виявляється Р-зубцем. За одну реалізацію серцевого циклу

прийнято інтервал P-R, оскільки R-зубець відповідає моменту активації потенціалу дії (Й. Шмидт-Фойгт (1966 р.)).

У результаті аналізу властивостей ФКС встановлено, що його амплітудні спектри за реалізаціями, розглядаючи ФКС як стаціонарну векторну ергодичну послідовність з періодом повторюваності рівному тривалості PP-інтервалу, є мінливими (рис. 3, 4), що свідчить про наявність в сигналі стохастичної складової. Отже фонокардіосигнал є процесом зі скінченною потужністю класу π^T (автокореляційна функція зникає), в якому наявна повторюваність (автокореляційна функція періодична) та випадковість (спектри реалізацій відрізняються, присутні флуктуації). Співфазні відліки сигналу в силу означення даного класу процесів мають одну і ту ж статистику другого порядку.

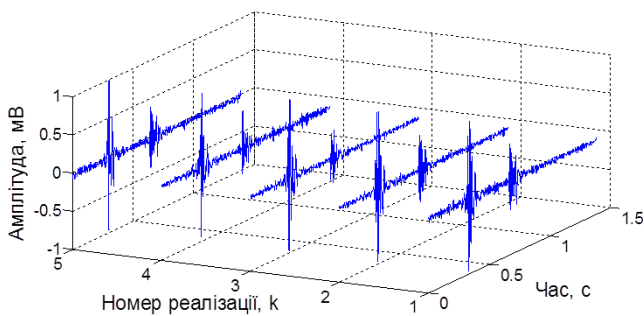


Рис. 1. Ансамбль реалізацій ФКС

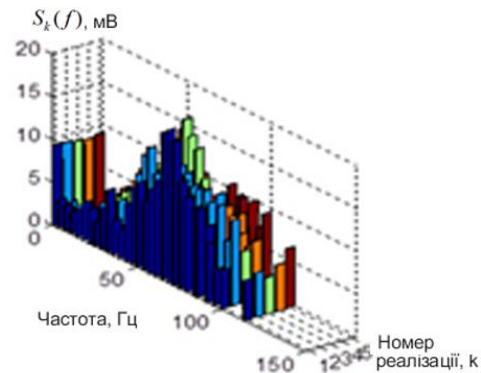


Рис. 3. Реалізації амплітудних спектрів ФКС

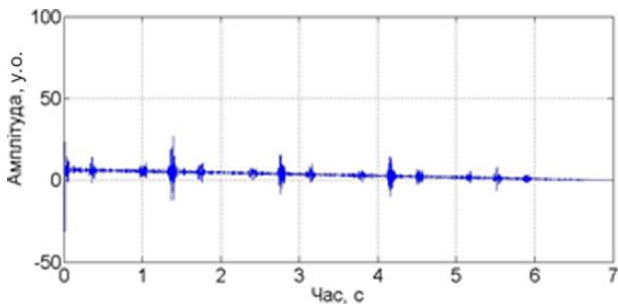


Рис. 2. Автокореляційна функція ФКС

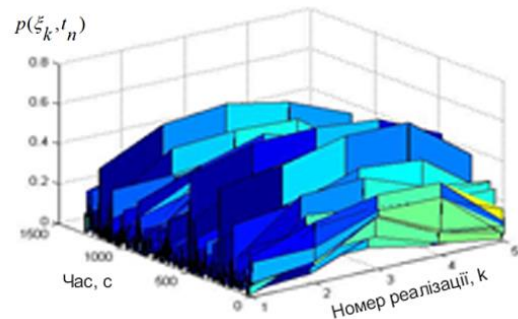


Рис. 4. Варіація густин розподілу ймовірностей реалізацій ФКС $p(\xi_k, t_n)$

Отже математична модель ФКС (одночасно зареєстрованого з ЕКС) як ПКВП та модифікований синфазний метод опрацювання його дають можливість, опираючись на принцип бімедійності, одержання достовірних часово-інваріантних ознак, що характеризують стан ССС.

У **третьому розділі** базуючись на обґрунтованій моделі отримано нові вирази оцінок характеристик ФКС, що уможливило розрахунок параметрів цифрового опрацювання його та одержання відповідних методів з високою достовірністю результатів оцінювання. Розвинуто спектрально-кореляційний метод отримання інформативних характеристик ФКС на підставі застосування синфазного методу аналізу.

Попереднє опрацювання проведено за алгоритмом: детрендіг сигналу (позбавлення від тренду, постійної складової сигналу), згладжування (позбавлення від високочастотних шумів, наведень з мінімальним спотворенням спектру та зміщенням локалізацій зубців), знаходження періоду повторюваності за Р-зубцями.

Позаяк синфазний метод є нечутливим до когерентних складових, наявних у сигналі, тому потреба позбуватися наведень відпадає. Задля мінімізації тренду застосовано високочастотний фільтр Бесея, який характеризується максимально плоскою амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ), лінійною фазо-частотною характеристикою (ФЧХ) та постійним часом групової затримки. На апаратному рівні застосовано фільтр Бесея реалізованого за схемою Селена-Кея, яка є малочутливою до розкиду параметрів реактивних елементів схеми та дає можливість регулювання коефіцієнт підсилення в смузі пропускання. Дискретні фільтри Бесея не мають цієї властивості.

Тому для опрацювання сигналу на програмному рівні застосовано КІХ-фільтрацію (що забезпечує лінійність ФЧХ) методом перекриття-додавання (overlap-add method, OLA), що дає значну вигоду у використанні апаратно-програмних ресурсів, у порівнянні з фільтрацією в часовій області (згортка).

У клінічній практиці за тривалість серцевого циклу приймають R-R інтервал, однак це не відповідає природі досліджуваного об'єкта, оскільки початком кожної наступної реалізації циклу серцевого скорочення є момент прояву потенціалу дії синусового вузла, що на ЕКГ є Р-зубцем.

Оскільки значення амплітуди Р-зубця набагато менше, ніж R-зубця і форма його є більш плавною, то він більше спотворюється під впливом високочастотних шумів. При низьких значеннях відношення сигнал/шум встановити коректно локалізацію максимуму з високою точністю проблематично. Застосування фільтрів низьких частот є недопустимим, оскільки вони, окрім фазових спотворень, сильно розмивають стрімкі зубці та зсувають їх у часі. У цьому випадку високочастотні шуми є некорельованими з корисним сигналом, тому використано згладжування. Для згладжування сигналу використано фільтр Савіцького-Голея. Така фільтрація забезпечує поліноміальну апроксимацію окремих кадрів вхідної послідовності за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки, то в цьому сенсі він є оптимальним і не порушує форму корисного сигналу за умови належного підбору порядку полінома і ширини вікна згладжування.

Для оцінювання якості згладжування приймаємо два критерії: значення максимального відхилення (горизонтального зміщення) і-го Р-зубця після проведення процедури згладжування адитивної суміші ЕКС та білого шуму зі співвідношенням амплітуд 1/0,05 із застосуванням фільтра Савіцького-Голея, та середньоквадратичне відхилення реального та фільтрованого ЕКС. При розв'язуванні мінімізаційної задачі використано метод найшвидшого градієнтного спуску по кривій перетину площин залежностей зсуву Р-зубця (площина № 1) та середньоквадратичного відхилення (площина № 2) від параметрів фільтра

згладжування – довжина кадру та порядок згладжувального полінома фільтра (рис. 5).

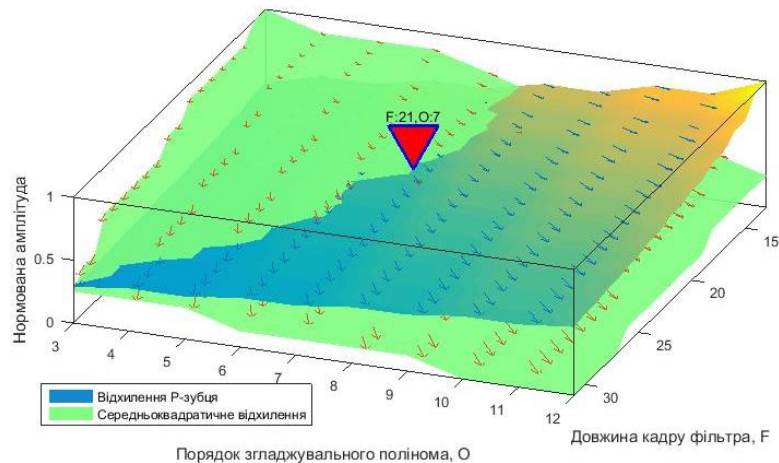


Рис. 5. Розв’язування оптимізаційної задачі вибору параметрів оптимального фільтра Савіцького-Голея

Вказівником показано точку локального мінімуму та значення оптимальних параметрів фільтра Савіцького-Голея на вибраному діапазоні. Для пошуку Р-зубців у згладженому сигналі використано пороговий метод оскільки в такому випадку відпадає необхідність застосування різного роду процедур розпізнавання форми, пошуку патернів, переходу в іншу область.

Застосований алгоритм дає можливість зменшити негативний вплив шумів при попередньому опрацюванні ЕКС синфазним методом та підвищити повторюваність результатів. Обробку ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС здійснено синфазним методом на вибірці довжиною 10 реалізацій циклу серцевого скорочення (по Р-зубцях).

Для отримання реалізацій центрованого фонокардіосигналу використано вираз:

$$\xi_n^0(t) = \xi_n(t) - m_{\xi_n}(t) \quad (3)$$

де: $\xi_n^0(t)$ – центрований сигнал на n -й реалізації; $\xi_n(t)$ – n -а реалізація зареєстрованого сигналу; $m_{\xi_n}(t)$ – математичне сподівання на n -й реалізації.

Оцінки кореляційної функції фонокардіосигналу обчислено за виразом:

$$\hat{b}_{\xi}(t_0, u) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-10} \xi(t_0 + u + kT) \xi(t_0 + kT). \quad (4)$$

Оцінки кореляційних компонент фонокардіосигналу (рис. 6):

$$\hat{B}_k(u) = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{b}_{\xi}(t, u) e^{-ik \frac{2\pi}{T} t} dt, \quad (5)$$

де N_T – дискретний період корельованості ФКС, $N_T = T/\Delta t$, Δt – крок дискретизації, u – зсув, N_k – кількість відгуків ФКС.

Усереднені оцінки кореляційних компонент обчислено за виразом (рис. 7):

$$M_t \left\{ \hat{B}_k(u) \right\} = \frac{1}{N_u} \sum_{u=1}^{N_u} \hat{B}_k(u), \quad u = \overline{1, N_u}, \quad k = \overline{1, N_k} \quad (6)$$

де k – номер кореляційної компоненти, N_k – кількість кореляційних компонент.

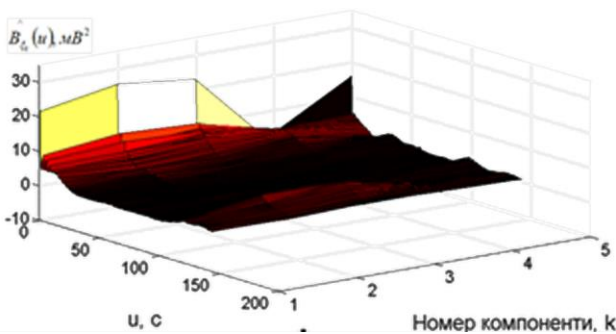


Рис. 6. Оцінка спектральних компонент

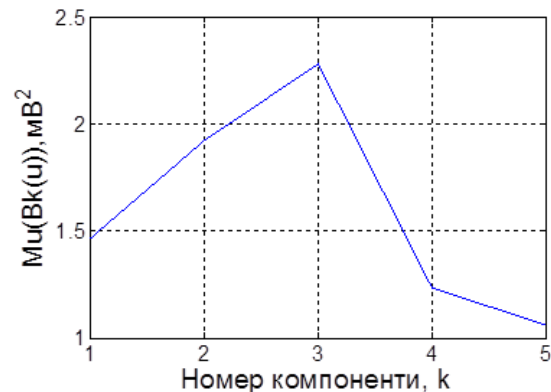


Рис. 7. Усереднені оцінки спектральних компонент ФКС

Одержані спектральні компоненти є інформативно-інваріантними ознаками стану ССС, які несуть відомості про наявність патологічного процесу на ранній стадії розвитку його, що уможлиблює скринінг пацієнтів без застосування дороговартісних та складних засобів дослідження.

У четвертому розділі розроблено комп'ютерну імітаційну модель сигналу у вигляді адитивно-мультиплікативної суміші стаціонарного випадкового процесу та детермінованої функції. До основних її переваг належить простота, невимогливість до «машинних» ресурсів, а також можливість врахування випадковості характерної для ФКС:

$$\xi(t) = \sum_k^{N_k} \left(\begin{array}{l} \tilde{\xi}_k(E(s_{nk}, A_{nk} + \psi_A, T_{nk}, v_{nk}, t_n) \cdot (w \cdot \omega n(T_{nk} - o_{T_{n-1k}}) \cdot h(f_{nkl} + \psi_{f_{nkl}}, f_{nkh} + \psi_{f_{nkh}}))) \cdot t \in [T_{k-1}, T_k) \\ 0 \cdot t \notin [T_{k-1}, T_k) \end{array} \right), \quad (8)$$

де: $\tilde{\xi}_k$ – k -а реалізація;

N_k – кількість реалізацій ФКС;

M_k – кількість інтервалів ФКС у межах k -ї реалізації.

$$E(s_{nk}, A_{nk}, \psi_A, T_{nk}, v_{nk}, t_n) = \begin{cases} \frac{A_{nk}}{1 + \left(\frac{0.5 \cdot T_{nk}}{t_n}\right)^{v_{nk} \cdot 10}} + \psi_A, s_{nk} > 0 \\ \frac{2 \cdot A_{nk}}{1 - \left(\frac{0.5 \cdot T_{nk}}{t_n}\right)^{v_{nk} \cdot 10}} + \psi_A, s_{nk} < 0 \end{cases}$$

s_{nk} – маркер зростання/спадання апроксимуючої функції n -го інтервалу k -ї реалізації; A_{nk} – амплітуда n -го інтервалу k -ї реалізації; T_{nk} – тривалість n -го інтервалу k -ї реалізації; v_{nk} – швидкість зростання/спадання n -го інтервалу k -ї реалізації; t_n – інтервал визначеності n -го інтервалу; w – вікно Блекмана; wn – білий шум; o – коефіцієнт перекриття n -го інтервалу тривалістю T_{nk} k -ї реалізації відносно $n-1$ -го інтервалу тривалістю T_{n-1k} k -ї реалізації; $h(f_{nkl} + \psi_{f_{nkl}}, f_{nkh} + \psi_{f_{nkh}})$ – ядро згортки смугового КІХ-фільтра з нижньою f_{nkl} та верхньою f_{nkh} границею смуги пропускання; $\psi_{A_{nk}}(M(A_{nk}), D(A_{nk}))$, $f_{nkl}(M(f_{nkl}), D(f_{nkl}))$ і $f_{nkh}(M(f_{nkh}), D(f_{nkh}))$ – випадкові величини для амплітуд, нижньої і верхньої частот зрізу смугового фільтра n -го інтервалу k -ї реалізації з Гаусовим законом розподілу із математичним сподіванням $M\{A\} = M(f_{nkl}) = M(f_{nkh}) = 0$ та дисперсіями $D(f_{nkl})$, $D(f_{nkh})$; $k \in Z, n \in Z$ – множини дійсних чисел.

Результати імітаційного моделювання, наведені на рисунку 8, підтвердили коректність імітаційного моделювання:

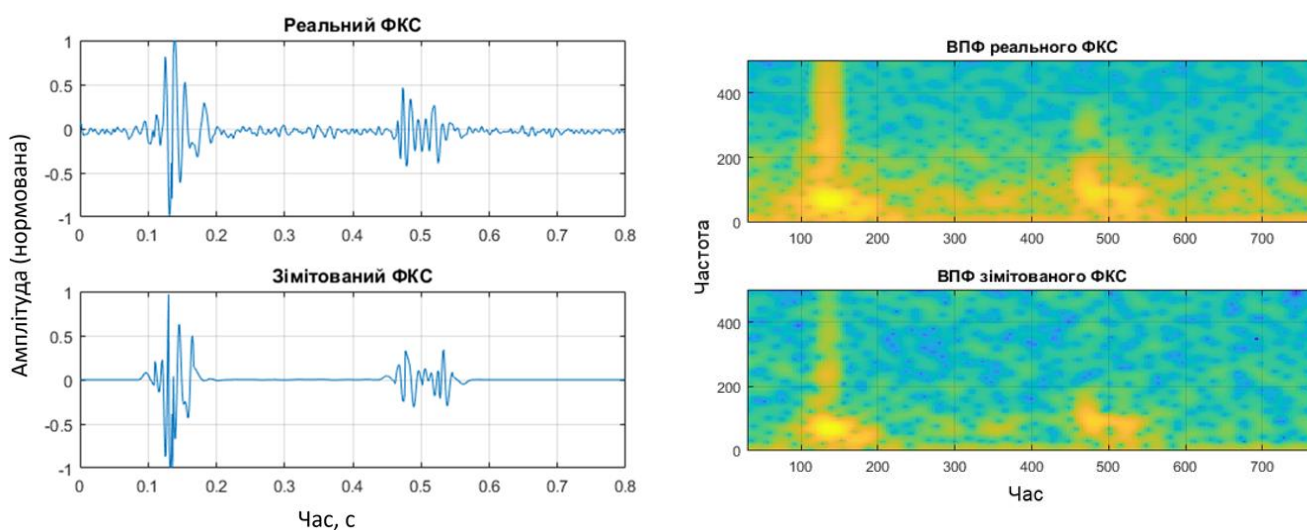


Рис.8. Реальний та зімітований сигнал (зліва), та їх спектрограми (справа).
Відповідно, реальний сигнал зверху, змодельований – знизу

Для оцінювання достовірності результатів опрацювання застосовано CFAR-метод (Constant False Alarm Rate або ж «постійна імовірність хибних тривог»), який є модифікацією статистичного критерію Неймана-Пірсона і є адаптивним, що дає можливість оцінити достовірність результатів опрацювання ФКС. Достовірність оцінок обчислено за формулою:

$$P_d = \frac{\text{sum}(D > T)}{N_{\text{trial}}}, \quad (9)$$

де P_d – значення достовірності, що в термінах моделювання за методом Монте-Карло є відношенням кількості перетинів до кількості «спроб», тобто загальної довжини досліджуваної послідовності; D – усереднені значення дисперсії відліків ФКС; $T = aP_n$ – динамічний поріг розрізнення, обчислений у ковзному вікні; $a = N(P_{fa}^{-1/N} - 1)$ – масштабний фактор; $P_n = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N x_m$ – середнє по відліках x_m опрацьовуваної послідовності у вікні довжиною N ; $P_{fa} = \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(\sqrt{SNR})]$ – імовірність хибної тривоги; erf – функція помилок; $\sqrt{SNR} = \frac{T_{mf}}{\sqrt{N_s M_s}}$ – корінь квадратний від співвідношення сигнал/шум; N_s – потужність сигналу; M_s – коефіцієнт підсилення узгодженого фільтра; T_{mf} – поріг після узгодженого фільтра.

Результати обчислених миттєвих значень достовірностей P_d стаціонарних компонент ФКС при заданих ймовірностях помилки $P_{fa} = (0.001, 0.01, 0.1)$, вказують на те, що оцінки стаціонарних компонент ФКС є інваріантно-інформативними ознаками, за допомогою яких можна з високою достовірністю (0,9784–0,9872) оцінити стан серцево-судинної системи людини (стан норми чи патології) на ранній стадії розвитку патології, що підтверджує адекватність математичної моделі ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС у вигляді ПКВП. Для мінімізації можливості виникнення помилки другого роду та, враховуючи той факт, що досліджуваний сигнал є стохастичним, застосовано подвійну верифікацію результатів моделювання шляхом введення додатково процедури оцінювання одержаних результатів із застосуванням критерію однорідності Смірнова, що використовується для перевірки гіпотези про приналежність двох незалежних вибірок одному закону розподілу. Встановлено, що достовірність результатів становить (0,9873–0,9952).

Розроблено програмне забезпечення в середовищі Matlab для автоматизованих систем діагностики функціонального стану ССС. Інтерфейс програми та результат опрацювання показано на рисунку нижче.

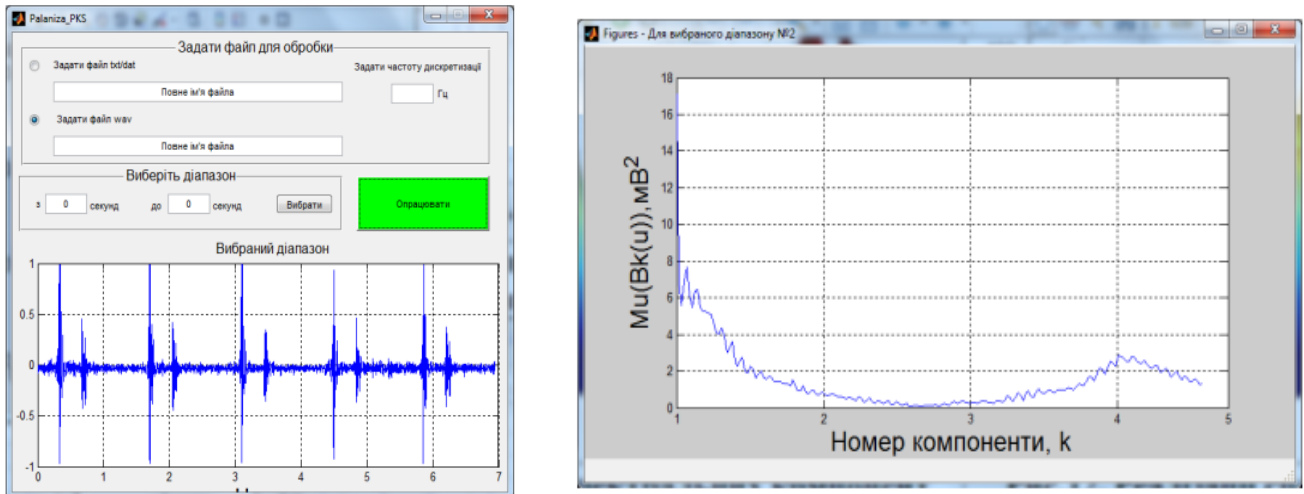


Рис. 11. Інтерфейс програми Palaniza_PKS (зліва) та результат роботи програми (справа)

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальну наукову задачу удосконалення математичної моделі та методів аналізу ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС із врахуванням механізму породження його для підвищення достовірності ранньої діагностики стану ССС людини в автоматизованих діагностичних системах.

При цьому отримано такі результати:

1. У результаті проведеного порівняльного аналізу відомих математичних моделей фонокардіосигналу сформульовано основні вимоги до математичної моделі ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС: врахування статистичної взаємопов'язаності між різними реалізаціями серцевого циклу скорочень та можливість застосування для задач оперативного виявлення змін стану ССС на ранніх стадіях захворювання.

2. Опіраючись на принцип бімедійності, який показує, що робота ССС як гемодинамічної системи є енергетичним процесом, що протікає одночасно у двох фізично різних середовищах (акустичний процес у пружному та електричний у провідному), з математичної точки зору є векторним процесом і описується як диверс-вектор, який існує одночасно в двох різних просторах зі своїми базисами та однорідними компонентами. Оцінювання роботи ССС за ФКС (як векторний процес у пружному середовищі) доповнюється відомостями одержаними із ЕКС (як векторний процес у провідному середовищі). Базуючись на концепції «шунтування», обґрунтовано модель ФКС одночасно зареєстрованого з ЕКС у вигляді періодично корельованого випадкового процесу, яка, на відміну від відомих, відображає механізм генезу його, що дає змогу визначення інформативно-інваріантних характеристик сигналу і враховує поєднання стохастичності із повторністю сигналу.

3. Модифіковано синфазний метод статистичного опрацювання фонокардіосигналу, який дає змогу оцінити стан ССС людини, зокрема на ранніх стадіях розвитку захворювання.

4. Установлено, що отримані значення спектральних компонент є характеристиками інформативно-інваріантних ознак фонокардіосигналу та дають змогу оцінити функціональний стан ССС людини.

5. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель фонокардіосигналу базуючись на обґрунтованій математичній моделі для задач верифікації і тестування розроблених методів опрацювання фонокардіосигналу.

6. Створено пакет комп'ютерних програм статистичного опрацювання фонокардіосигналу на основі модифікованого методу, який придатний для використання як складової частини спеціалізованого програмного забезпечення автоматизованих комп'ютерних діагностичних систем.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати

1. Дозорський В. Г., Фалендиш В. В., Дедів Л. Є., Паляниця Ю.Б. Метод виявлення проявів ішемічної хвороби серця для медичних систем контролю стану пацієнта // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2015. Випуск 1, частина 1 (90). С. 63–68.
2. Драган Я., Никитюк В., Паляниця Ю. Енергетично-сигнальна концепція визначення стану технологічного стоматологічного процесу як енергоактивного об'єкта // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: *Комп'ютерні науки та інформаційні технології* : збірник наукових праць, 2015. № 826. С. 368–372. Бібліографія: 9 назв.
3. Паляниця Ю. Б. Сучасні підходи до опрацювання фонокардіосигналу та математична модель його у вигляді періодично корельованого випадкового процесу // *Вісник Хмельницького національного університету*. *Технічні науки*, 2016. Вип. 2(235). С. 90–93.
4. Драган Я. П., Паляниця Ю. Б., Гевко О. В., Дедів І. Ю. Обґрунтування структури системи дистанційної діагностики адаптаційних резервів серця // *Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць*. Львів: РВВ НЛТУ України, 2015. Вип. 25.10. С. 255–259.
5. Драган Я. П., Грицюк Ю. І., Паляниця Ю. Б. Системний аналіз статистичного оцінювання станів стохастичної вібраційної системи і принципу шунтування // *Науковий вісник України: Збірник науково-технічних праць*. Львів: РВВ НЛТУ України, 2016. Вип. 26.1. С. 395–402.
6. Palaniza Y. B., Shadrina H. M., Khvostivskiy M. O., Dediv L. Ye., Dozorska O. F. Main theoretical basis of biosignals modeling // *Znanstvena misel in Slovenia: journal, Ljubljana*, 2018. №16. Vol.1. P.39–44.
7. Dragan Y. P., Nykytyuk V. V., Palaniza Y. B. The research object mathematical model

substantiation for physical and technical sciences as result, in particular, in the case of a power-activated object with a regulated activator system analysis // *Znanstvena misel in Slovenia: journal, Ljubljana*, 2018. №19. P.42–47.

8. Palaniza Y. B., Yavorska E. B., Shadrina H. M., Dediv L. E. Phonocardiogram as a periodically correlated stochastic process preprocessing algorithm structure grounding // *Visnyk TNTU*. 2018, № 3 (91). С. 143–152.
9. Патент 119246 UA, МПК А61В 5/0432 (2006.01) А41D 13/12 (2006.01) Одяг для моніторингу стану серцево-судинної системи / Драган Я. П., Паляниця Ю. Б., Гевко О. В., Дедів Л. Є., Яворська Є. Б., Шадріна Г. М. – № u 201609140; заявл. 31.08.2016; опубл. 25.09.2017. Бюл. № 18, 2017 р.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Паляниця Ю. Б., Дедів Л. Є. Імітаційна модель фонокардіосигналу // Матеріали XV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: зб. тез доповідей, 14–15.12.11 р. Тернопіль: ТНТУ, 2011. С. 165.
11. Паляниця Ю. Б., Дедів Л. Є. Імітаційна модель фонокардіосигналу // Матеріали Міжнародного наукового симпозиуму «Досягнення сучасної науки». 19–30 червня 2012р. – Іваново, РФ. 3 с.
12. Паляниця Ю. Обґрунтування вибору математичного підходу для опису фонокардіосигналу людини // Матеріали XVII-го науково-технічного форуму «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Сб. материалов форума. Т. 1. Харьков: ХНУРЕ, 2013. 323 с.
13. Паляниця Ю., Дедів Л., Дозорський В. Метод опрацювання фонокардіосигналу для задач діагностування та ідентифікації захворювань малого кола кровообігу // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2013», 5–6 червня 2013 р. Іваново, РФ. С. 100–101.
14. Паляниця Ю., Хвостівський М. Обґрунтування математичної моделі фонокардіосигналу у вигляді імпульсного періодично корельованого випадкового процесу // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні задачі сучасних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 11–12 грудня 2013 р. Тернопіль: ТНТУ, 2013. С. 218–219.
15. Паляниця Ю. Б., Гевко О. В. Дистанційна діагностика адаптаційних резервів серця // Міжнародна науково-практична конференція «*Perspective innovations in science, education, production and transport 2014*», 16–26 грудня 2014р. Іваново, РФ. 4 с.
16. Драган Я., Грицюк Ю., Паляниця Ю. Системний аналіз – засіб обґрунтування математичної моделі досліджуваного об'єкта як системи // *Advanced Information and Communication Technologies–2015: Proceedings of 1st International Conference*

(AICT2015), October 29 – November 1, 2015, Lviv, Ukraine. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2015. P. 159–161.

17. Паляниця Ю. Б., Шадріна Г. М. Обґрунтування вибору алгоритму попереднього опрацювання фонокардіосигналу як періодично корельованого випадкового процесу // Матеріали XIX наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: зб. тез доповідей, 18–19.05.16 р. Тернопіль: ТНТУ, 2016. С. 117.
18. Драган Я. П., Грицюк Ю. І., Сікора Л. С., Яворський Б. І., Паляниця Ю. Б. Класи варіантності сигналів і їх лінійних перетворень та чисельні методи – висліди системного аналізу ряду Тейлора // Матеріали IV науково-технічної конференції «Обчислювальні методи і системи перетворення інформації» Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України: зб. тез доповідей, 2016 р. Лівів: ФМІ, 2016. 5 с.
19. Паляниця Ю. Б., Кінаш Р. В., Богонович І. Є. Застосування OLA-методу для опрацювання біосигналів в кардіологічній практиці // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: зб. тез доповідей, 16–17.11.17 р. Тернопіль: ТНТУ, 2017. Т2. С. 144.
20. Паляниця Ю. Б., Франчевська Г. І. Енергетичні аспекти обробки біосигналів у кардіологічній практиці // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: зб. тез доповідей, 28–29.11.18 р. Тернопіль: ТНТУ, 2018. Т3. С. 243.

АНОТАЦІЯ

Паляниця Ю. Б. Математична модель фонокардіосигналу для удосконалення 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, 2019 р.

У дисертаційній роботі розв’язано актуальне наукове завдання – удосконалення математичної моделі та методів аналізу фонокардіосигналу одночасно зареєстрованого з електрокардіосигналом із врахуванням механізму породження

його для підвищення достовірності ранньої діагностики стану серцево-судинної системи людини в автоматизованих діагностичних системах.

Обґрунтовано нове застосування періодично корельованого випадкового процесу як математичної моделі фонокардіосигналу одночасно зареєстрованого з електрокардіосигналом, яка, на відміну від відомих, відображає механізм породження його (генезу), що дає змогу визначення характеристик моделі за

результатами експериментів і враховує поєднання стохастичності із повторністю сигналу.

Базуючись на обґрунтованій математичній моделі та на концепції «шунтування», модифіковано синфазний метод статистичного опрацювання фонокардіосигналу одночасно зареєстрованого з електрокардіосигналом у системах автоматизованої діагностики, з урахуванням механізму генезу фонокардіосигналу. У результаті опрацювання отримано значення спектральних компонент фонокардіосигналу, які є його інформативно-інваріантними ознаками та із визначеною достовірністю характеризують функціональний стан серцево-судинної системи людини.

Розроблено метод імітаційного моделювання фонокардіосигналу на основі періодично корельованої випадкової послідовності для верифікації результатів досліджень. Створено пакет комп'ютерних програм для автоматизованого опрацювання фонокардіосигналу та проведення імітаційних експериментів для автоматизованих діагностичних систем.

Ключові слова: фонокардіосигнал, електрокардіосигнал, генез фонокардіосигналу, періодично корельований випадковий процес, спектральні компоненти, достовірність, верифікація, комп'ютерне імітаційне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Паляница Ю. Б. Математическая модель фонокардиосигнала для усовершенствования кардиодиагностичных 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, 2019 г.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача – совершенствование математической модели и методов анализа фонокардиосигнала параллельно зарегистрированного с электрокардиосигналом с учетом механизма порождения его для повышения достоверности ранней диагностики состояния сердечно-сосудистой системы человека в автоматизированных диагностических системах.

Обосновано новое применение периодически коррелированного случайного процесса как математической модели фонокардиосигнала параллельно зарегистрированного в электрокардиосигналом, которая, в отличие от известных, отражает механизм порождения его (генеза), что дает возможность определения характеристик модели по результатам экспериментов и учитывает сочетание стохастичности с повторяемостью сигнала.

Базируясь на обоснованной математической модели и на концепции «шунтирования», модифицировано синфазный метод статистической обработки фонокардиосигнала параллельно зарегистрированного в электрокардиосигналом в системах автоматизированной диагностики, с учетом механизма генеза фонокардиосигнала. В результате обработки получено значение спектральных компонент фонокардиосигнала, которые являются его информационно-

инвариантными признаками и с определенной достоверностью характеризующих функциональное состояние сердечно-сосудистой системы человека.

Разработан метод имитационного моделирования фонокардиосигнала на основе периодически коррелированных случайной последовательности для верификации результатов исследований. Создан пакет компьютерных программ для автоматизированной обработки фонокардиосигнала и проведения имитационных экспериментов для автоматизированных диагностических систем.

Ключевые слова: фонокардиосигнал, электрокардиосигнал, генез фонокардиосигнала, периодически коррелированный случайный процесс, спектральные компоненты, достоверность, верификация, компьютерное имитационное моделирование.

ANNOTATION

Palaniza Y. B. A phonocardiogram mathematical model for cardio-diagnostic systems improvement. –Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences after speciality 01.05.02 – mathematical design and calculable methods. – Ternopil Ivan Puluj national technical university, Ternopil, 2019.

In dissertation the important scientific task is solved – the phonocardial signal synchronously registered with electrocardiosignal mathematical model and analyzing methods improvement taking into account the mechanism of its generation for the human SSS state early diagnosis in automated diagnostic systems reliability increasing.

Modern diagnostic systems widely use the polycardiogram method based on the synchronously recorded electrocardio- (ECG) and phonocardiogram (PCG). Complete information about the cardiovascular system state (CVS) can be obtained only in case when several of pathologies diagnosing methods are used simultaneously. The advantages of a comprehensive approach were indicated in a number of scientific works, by: M. A. Kurshakov, P. E. Lukomsky, S. A. Lupenko, A. A. Selidovkina.

The heart rate (HR) is determined by the sinus node automatism, which is modulated by feedback through the influence of vegetative, humoral, and local factors. Therefore, the heart work can be described as «modulation»– each of the action potential impulses sequence causes the response in the form of series of consecutive time-varying heart contractions/relaxation. The shape, duration and phase shifts of these impulses may vary, depending on the physical loadings, the emotional state and a whole set of other exogenous and endogenous influences. The responses wouldn't have constant parameters depend on the factors such as: the conducting system state: the GIs beam right leg blockade, the effort of the blood flow through the heart structures (prolapse, stenosis, aneurysms), postinfarctional scarring, and many other factors, which has a great diagnostic value.

Based on the considerations set in R. M. Baevsky, A. A. Talakov «Balistocardiography» work, the person`s cardiovascular system should be regarded as a closed hemodynamic one, where the primary information carrier about it is, among other

things, is a phonocardiogram generated by mechanical and acoustic processes in the system. It is used for obtaining additional (often critical) data to increase the researched object's evaluation parameters reliability and the bimedia principle as the separation of the signal energy generated by one source, in space-time into two «flows» of different physical nature and (electric and mechanical) introduced the concept of «shunting».

By shunting we understand the principle of obtaining complementary information about the object through «bypass»«short» way, in particular, getting of the certain informative parameters from the signal of another physical process nature (electrical, in contrast to the acoustic) of the same genesis in terms of the signal-system concept.

Preprocessing was carried out according to the algorithm: signal detrending, smoothing, finding the repeatability period for the P-wave interval.

A new application of the periodically correlated random process as a mathematical model of a phonocardiogram synchronously registered with electrocardiogram is obtained, which, unlike known ones, represents the mechanism of its genesis. Based on a previously grounded mathematical model and on the concept of «shunting», the synphase method of statistical processing of a phonocardiogram synchronously registered with an electrocardiogram in automated diagnostic systems was modified, taking into account a phonocardiogram genesis mechanism. As the processing result, the value of the phonocardiogram spectral components were obtained, which are its information-invariant features and with certain certainty characterizing the functional state of the human SSS. Since the synphase method is insensitive to the coherent components presented in the signal, therefore no need to use alien crosstalk effects minimization procedure. Since the developed algorithm is focused on its application in the patient's CVS state remote monitoring systems, so in order to trend minimization, it is proposed to use the hardware implementation the high-pass Bessel filter (Sallen-Key topology) implementation, which has uniform (flat) amplitude–frequency response characteristics (AFR) (minimal equiripple in passband), linear phase-frequency characteristic (PFR), and the constant group delay, parameter variation resistance. Bessel Discrete Filters do not have this property. Therefore, to process the signal at the software level, the FIR-filtering (which provides linearity of the PFR) is applied by the overlap-add method (OLA), which gives significant advantage in using hardware and software resources, in comparison with time-domain filtering (convolution)

As a result of processing, the phonocardiogram spectral components, which are its informatively invariant features and with definite reliability characterize the functional state of the human cardiovascular system, is obtained. A method for simulating a phonocardiogram signal based on periodically correlated random sequences has been developed to verify the results of studies. A package of computer programs has been created for the automated processing of phonocardiogram signals and for carrying out simulation experiments for automated diagnostic systems. Key words: phonocardiogram-signal, electrocardiogram, genesis of phonocardiogram signal, periodically correlated random process, spectral components, reliability, verification, computer simulation.

Key words: phonocardiosignal, electrocardiosignal, phonocardiosignal genesis, periodically correlated random processes, spectral components, certainty, verification, biosignal simulation.



Підписано до друку 25.04.2019 р.

Формат 60×90 Папір ксероксний.

Обл. вид. арк. 0,9

Наклад 100 прим. Зам. № 3192.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

E-mail: vydavnytstvo@tu.edu.te.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4226 від 08.12.11.