

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

Фалендиш Володимир Володимирович

УДК 519.218:617.73

**УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ
РИТМОКАРДІОСИГНАЛУ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ
ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль — 2012

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Яворський Богдан Іванович,
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, завідувач кафедри біотехнічних систем

Офіційні опоненти

доктор фізико-математичних наук, професор
Сопронюк Федір Олексійович
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, завідувач кафедри математичних проблем управління і кібернетики

доктор технічних наук, професор
Дивак Микола Петрович
Тернопільський національний економічний університет, завідувач кафедри комп'ютерних наук

Захист відбудеться "____" _____ 2012 р. о "___" год. "___" хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради **К 58.052.01** в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

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

Автореферат розісланий "____" _____ 2012 р.

*Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради К 58.052.01*

Шелестовський Б.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток складних високотехнологічних процесів виявив наявність гострої проблеми оцінювання функціонального стану людини-оператора, як найважливішого елемента складних людино-машинних (ергатичних) систем (ЛМС). Центральним питанням оптимізації діяльності операторів ЛМС є проблема об'єктивного технічного контролю поточного функціонального стану (зокрема засинання і дрімоти) оператора безпосередньо в процесі роботи з допомогою технічних засобів. Використання ритмокардіосигналу (РКС) – послідовності значень RR-інтервалів електрокардіосигналу в системах контролю функціонального стану операторів ергатичних систем вважають найбільш доцільним, що обумовлено його високою чутливістю як індикатора функціонального стану, а також тісним зв'язком динаміки спектральних характеристик РКС із зміною фізіологічного та психологічного стану організму людини (Баєвський Р., Рябикіна Г., Жемайтіте Д.).

Для оцінювання спектральних характеристик ритмокардіосигналу застосовують низку програмно-апаратних комплексів (виробників МІДА, CardioNet Inc., WristClinic, DiaCard, ХАІ-Медика, DX-Комплекси, Neurosoft). Проте, оцінювання характеристик РКС проводять відомими методами з припущенням, що РКС є стаціонарним випадковим процесом (СВП). Оператор ЛМС під час виконання професійних обов'язків перебуває під дією великої кількості подразників, що спричиняє нестационарність ритмокардіосигналу (Рагозин А., Хаяутін В., Локушкова Е.). Невідповідність застосованої математичної моделі ритмокардіосигналу до самого ритмокардіосигналу призводить до низької вірогідності отриманих оцінок РКС та відповідно до великої кількості помилок першого та другого роду в роботі названих комплексів.

Для врахування нестационарності РКС застосовують відомі компонентний та когерентний методи побудовані на моделі періодично корельованої випадкової послідовності з дискретним часом (Драган Я.П., Яворський Б.І., Яворська Є.Б.). Оцінювання спектральної густини потужності в даному випадку відбувається з допомогою перетворення Фур'є над автокореляційними компонентами сигналу отриманими з допомогою компонентного чи когерентного методу, що потребують наявності всіх відліків реалізації та мають високу обчислювальну складність. Це значно ускладнює застосування названих методів в системах контролю функціонального стану людини в режимі реального часу, де необхідно оцінити людини стан за мінімальний час.

Отже, удосконалення обчислювальних методів обробки ритмокардіосигналу в системах контролю функціонального стану людини в режимі реального часу є важливою науковою задачею, а її розв'язання є актуальним.

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

Теоретичні дослідження та практична робота за даною тематикою проводилися при виконанні планових НДР Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя:

ВК20-06 – „Дослідження і розроблення методів та засобів виявлення евентуальних, циклічних та ритмічних сигналів”, інвентарний номер державної реєстрації 0106U002062, 2006-2007 рр.;

ВК22-08 – „Розроблення методів ідентифікації і верифікації математичних моделей сигналів при побудові медичних систем телемоніторингу та діагностики”, інвентарний номер державної реєстрації 0108U001110, 2008-2010 рр.;

Здобувач брав безпосередню участь у виконанні цих робіт і розробив засоби оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу фільтровим методом.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є удосконалення обчислювальних методів обробки ритмокардіосигналу в режимі реального часу в системах контролю функціонального стану людини. Для досягнення поставленої мети розв'язано такі задачі:

1) проаналізувати існуючі системи контролю функціонального стану людини за серцевим ритмом, застосовані в них моделі та методи обробки ритмокардіосигналу для вибору напрямку і шляху дослідження.

2) обґрунтувати застосування та провести параметричну ідентифікацію та спеціалізацію фільтрового методу оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент періодично корельованої випадкової послідовності з метою врахування особливостей ритмокардіосигналу в системах контролю функціонального стану людини для забезпечення побудови цифрових засобів оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу.

3) удосконалити метод розрахунку коефіцієнтів прямого та зворотного зв'язку цифрових резонаторів гребінок в заданому діапазоні частот для врахування параметрів фільтрового методу та нормування резонаторів за шириною смуги пропускання та модулем функції передачі.

4) розробити алгоритми та програмні засоби комп'ютерної реалізації гребінок цифрових резонаторів для оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу в системах контролю функціонального стану людини.

5) провести верифікацію розроблених програмних засобів, оцінити вірогідність отриманих оцінок спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу та оцінити обчислювальну складність розроблених програмних засобів.

Об'єктом досліджень є процес оцінювання спектральної густини потужності ритмокардіосигналу в системах контролю функціонального стану людини.

Предметом досліджень є методи та засоби для оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент нестаціонарного ритмокардіосигналу в системах контролю функціонального стану людини.

Методи досліджень побудовано на положеннях енергетичної теорії стохастичних сигналів (ЕТСС) та статистичної теорії вибору рішень — для удосконалення обчислювальних методів оцінювання характеристик ритмокардіосигналу та їх верифікації, теорії цифрової фільтрації – для розрахунку коефіцієнтів резонаторів гребінок в заданому діапазоні частот.

Наукова новизна досягнутих результатів:

1) Дістав подальший розвиток фільтровий метод оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент періодично корельованої випадкової послідовності у напрямку врахування особливостей реальних сигналів, зокрема його поширено на оцінювання спектральних характеристик нестаціонарного ритмокардіосигналу, що уможливило побудову нових засобів оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу в системах контролю функціонального стану людини.

2) На основі відомої математичної моделі ритмокардіосигналу вперше побудовано нові засоби для оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу у вигляді гребінок цифрових резонаторів з однаковою структурою, що дало змогу створити нові програмні засоби комп'ютерної реалізації для оцінювання характеристик ритмокардіосигналу з меншою обчислювальною складністю.

3) З використанням відомих аналітичних виразів розрахунку коефіцієнтів цифрових резонаторів та з врахуванням параметрів математичної моделі ритмокардіосигналу вперше отримано аналітичний вираз умови нормування цифрових резонаторів за модулем функції передачі чим удосконалено метод розрахунку коефіцієнтів прямих та зворотних зв'язків цифрових резонаторів, що уможливило побудову гребінок високодобротних цифрових резонаторів нормованих за шириною смуги пропускання та модулем функції передачі.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані результати роботи уможливили оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент нестаціонарного ритмокардіосигналу фільтровим методом в режимі реального часу з підвищеною вірогідністю та меншою обчислювальною складністю в системах контролю функціонального стану людини. Їх впроваджено:

- в роботі програмно-апаратного комплексу «CARDIO» (ТОВ «МІДА» м. Київ)

Особистий внесок здобувача в опубліковані у співавторстві роботи визначається такими науковими положеннями та результатами:

В роботах [1, 2, 6] – синтез структури, структурний синтез та розрахунок параметрів цифрових фільтрів для оцінювання параметрів РКС фільтровим методом.

В роботі [5] – побудова амплітудно-частотних характеристик гребінок фільтрів, оцінювання часових характеристик фільтрів.

В роботі [7] – визначення умов та початкових станів реєстрів фільтрів для зменшення часу перехідних процесів у фільтрах при аналізі нестаціонарного ритмокардіосигналу фільтровим методом.

В роботі [8] – визначення параметрів гребінок цифрових фільтрів для аналізу РКС фільтровим методом та побудова їх амплітудно-частотних характеристик.

В роботі [9] – розробка структури та алгоритму роботи системи автоматичного контролю функціонального стану людини за серцевим ритмом.

В роботі [10] – побудова оцінок спектральної густини потужності нестаціонарного РКС компонентним, когерентним та фільтровим методами.

В роботах [11, 13, 14] – розроблення методу розрахунку нормованих гребінок цифрових фільтрів, обґрунтування застосування цифрових резонаторів для побудови нормованих гребінок.

В роботі [12] – отримання оцінок спектральної густини потужності стаціонарних компонент варіабельності серцевого ритму з різними періодами корельованості фільтровим методом.

В роботі [15] – побудова тестової імітаційної моделі ритмокардіосигналу при засинанні людини.

Апробація результатів дисертації. Окремі результати дисертаційних досліджень апробовано на:

- Міжнародній конференції TCSET'2006, Львів (Славсько), 2006 р.;
- Міжнародній конференції CADSM'2007, м. Львів (Поляна), 2007 р.;
- 11 Міжнародному молодіжному форумі „РАДИОЕЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI ВЕКЕ”, м. Харків, 2007 р.;
- Міжнародній конференції «СИЭТ-2009» м. Одеса, 2009 р.;
- Міжнародній конференції TCSET'2010, Львів (Славсько), 2010 р.;
- Першому Всеукраїнському З'їзді "МЕДИЧНА ТА БІОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА І КІБЕРНЕТИКА" з міжнародною участю. м. Київ, 2010р.
- Щорічних науково-технічних конференціях ТДТУ імені Івана Пулюя (2006-2011 р.р.) та наукових семінарах кафедри Біотехнічних систем ТНТУ імені Івана Пулюя.

В цілому робота обговорювалася на засіданні наукового семінару Секції інформатики при Західному науковому центрі НАН України та МОН України, на засіданні наукового семінару кафедри інформатики та прикладної математики Рівненського державного гуманітарного університету, на засіданні наукового семінару Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка» та на засіданні наукового семінару кафедри математичних проблем управління і кібернетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 15 праць: статті у фахових наукових виданнях [1-5], тези у матеріалах наукових конференцій [6-15]. Праці [3, 4] опубліковано без співавторів.

Обсяг та структура дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, викладених на 115 сторінках машинописного тексту, переліку умовних позначень, списку літератури з 85 назв на 10 сторінках, додатків на 5 сторінках. Загальний об'єм роботи — 133 сторінки.

В першому розділі дисертації проведено аналіз існуючих систем контролю функціонального стану людини за серцевим ритмом та застосовуваних характеристик ритмокардіосигналу, аналіз математичних моделей ритмокардіосигналу і побудованих на їх основі методів оцінювання характеристик ритмокардіосигналу. В результаті проведеного аналізу було визначено, що спектр густини потужності ритмокардіосигналу (Рис. 1) відображає функціональний стан організму людини і за співвідношенням сумарних потужностей різних ділянок спектру густини потужності ритмокардіосигналу оцінюють функціональний стан організму та його зміну.

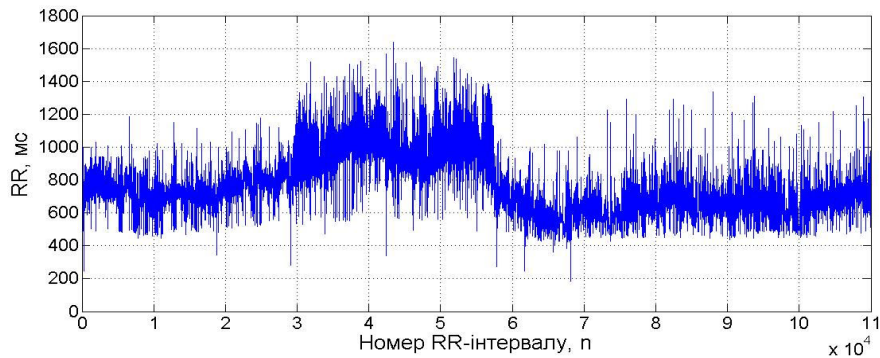


Рис. 1 - Добовий ритмокардіосигнал (отримано з допомогою комплексу CARDIO, Тернопільська комунальна міська лікарня швидкої допомоги).

У системах контролю функціонального стану людини застосовують оцінки СГП ритмокардіосигналу як стаціонарного випадкового процесу на інтервалі частот від 0 до 0,5 Гц. (Рис. 2).

Для оцінювання характеристик ритмокардіосигналу застосовують низку програмно-апаратних комплексів (виробників МІДА, CardioNet Inc., WristClinic, DiaCard, ХАІ-Медика, DX-Комплекси, Neurosoft). Оцінювання характеристик РКС проводять відомими методами з припущенням, що РКС є стаціонарним випадковим процесом (СВП), що при реальній нестационарності РКС призводить до того, що оцінки спектральної густини ритмокардіосигналу мають дуже велику дисперсію, яка зростає зі збільшенням статистики, що свідчить про низьку достовірність застосованих методів оцінювання спектральної густини.

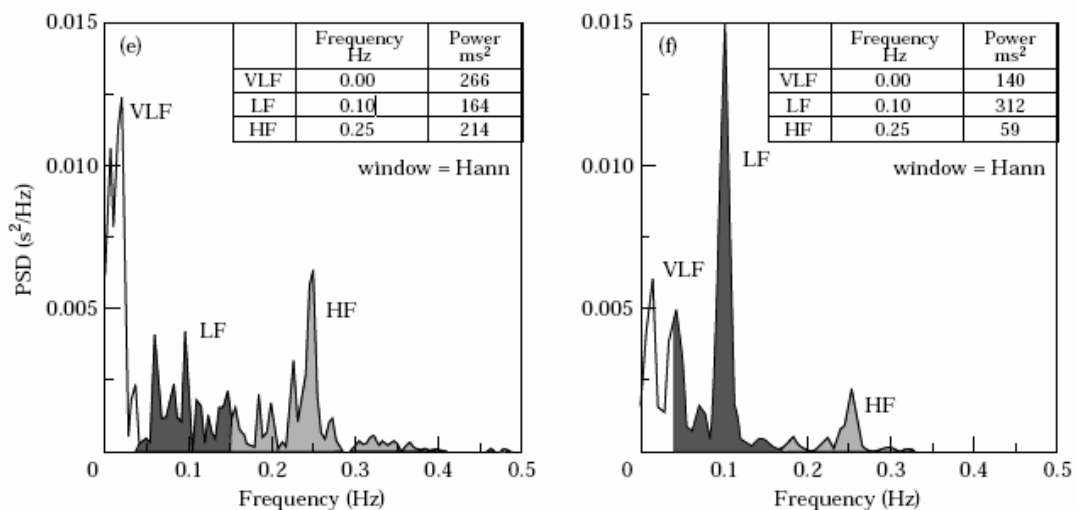


Рис. 2– Оцінки СГП ритмокардіосигналу здорової людини в стані спокою лежачи (зліва) та в положенні стоячи (справа) (Heart Rate Variability (Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use). Circulation 1996; # 93).

Адекватною математичною моделлю нестационарного РКС є модель ПКВП, яка передбачає представлення ритмокардіосигналу через стаціонарні компоненти та включає випадок стаціонарності ритмокардіосигналу як частинний. Основним параметром цієї моделі є період корельованості. Модель ПКВП для оцінювання характеристик передбачає 3 методи: компонентний, когерентний та фільтровий. Для оцінювання спектральної густини стаціонарних компонент ритмокардіосигналу в роботах Яворської Є.Б. розроблено та застосовано два методи: компонентний та

когерентний. Обидва методи для оцінювання спектральної густини стаціонарних компонент ритмокардіосигналу використовують перетворення Фур'є від параметричної автокореляційної функції РКС і відрізняються лише способом побудови останньої. Названі методи знайшли застосування для аналізу короткотривалих відрізків РКС.

Фільтровий метод на відміну від компонентного та когерентного для оцінювання спектральної густини стаціонарних компонент не потребує побудови автокореляційної функції та перетворення Фур'є, проте є параметричним, що ускладнює його застосування при аналізі коротких реалізацій РКС та завдяки пам'яті фільтрів має суттєві переваги при довготривалому аналізі в режимі реального часу.

В другому розділі дисертації проведено порівняльний аналіз компонентного, когерентного та фільтрового методів оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу. Енергетична теорія стохастичних сигналів обґрунтовує зображення нестационарного випадкового РКС $\xi_{RR}(n)$ через стаціонарні компоненти, з законом збереження середньої потужності (рівність Парсеваля) та вказанням типу їх корельованості $\xi_k(n)$:

$$\xi_{RR}(n) = \sum_{k \in Z} \xi_k(n) \exp\left(ik \frac{2\pi}{N_k} n\right) \quad (1)$$

стаціонарні послідовності відліків через період корельованості N_k , а також фільтрових вирізок із їхніх гармонічних зображень (Драган Я.П.)

Параметрична спектральна густина потужності періодично корельованого РКС $\xi_{RR}(n)$ має вигляд:

$$S_{\xi}(n, \omega) = \sum_{k \in Z} S_k(\omega) \exp\left(ik \frac{2\pi}{N_k} n\right). \quad (2)$$

Таким чином, безпосереднім наслідком гармонізованості ПКВП є існування параметричного частотно-часового спектру Вігнер-Вілля (Jerome Antoni.), а також середнього спектру (Драган Я.П.), еквівалентного спектру стаціонарного наближення до вихідного ПКВП.

Зі структури ПКВП впливає окрім компонентного та когерентного методів ще одна можливість оцінювання його характеристик яка, як і можливість обчислення синфазних оцінок, характерна тільки для даного класу випадкових процесів. Вводиться множина декомпозиційних (проекційних) фільтрів Φ_k^{Λ} , $k \in Z$, частотні характеристики яких є індикаторами відрізків розбиття осі $R = \prod_{k \in Z} \left[\left(k - \frac{1}{2}\right) A^{(m)}, \left(k + \frac{1}{2}\right) A^{(m)} \right)$, тобто множину ідеальних фільтрів з центральними частотами:

$$A^{(m)} = m \frac{1}{N_k} \quad (3)$$

Фільтрова вирізка за допомогою гребінки фільтрів Φ_m^A з центральними частотами $A^{(m)}$ із ПКВП збігається з k -ю його стаціонарною компонентою з фінітним спектром.

Кількість таких фільтрів визначає роздільну здатність методу, яка на відміну від роздільної здатності при перетворенні Фур'є не залежить від довжини реалізації РКС, періоду корельованості та кількості стаціонарних компонент.

У третьому розділі проведено параметричну ідентифікацію фільтрового методу оцінювання СГП стаціонарних компонент РКС, а саме визначено частотний діапазон для розрахунку гребінок фільтрів, наведено метрологічні характеристики РКС. Проведено синтез структури засобів оцінювання СГП стаціонарних компонент РКС, наведено вирази для оцінювання смуги пропускання, роздільної здатності, часу усереднення та статистичних похибок оцінювання спектральної густини потужності ритмокардіосигналу фільтровим методом.

Для діапазону приведених частот від 0 до 0,5 розроблено гребінки нормованих цифрових резонаторів для оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу.

Для оцінювання СГП стаціонарних компонент $\xi_k(n)$ РКС в режимі реального часу фільтровим методом відліки РКС поступають на входи гребінок цифрових фільтрів (Рис. 3).

Кожна гребінка фільтрів для смуги частот $[0;0,5]$ складається з $M = N_k R$, де $R = 1,2,3\dots$ визначає роздільну здатність гребінки фільтрів по частоті, цифрових високодобротних фільтрів F_m , $m=1\dots M$, (Рис. 6). Кожен цифровий фільтр F_m має такі параметри:

а) Резонансна частота $f_r^{(m)} = \frac{0,5}{M} m$, де $m=1\dots M$.

б) Ширина смуги пропускання $\Delta f = \frac{0,5}{M+1} = const$ для всіх фільтрів гребінки при заданому M

в) Добротність $Q^{(m)} = \frac{f_r^{(m)}}{\Delta f}$

За відомими виразами, враховуючи вказані вище параметри, визначаємо коефіцієнти зворотного зв'язку резонаторів (Рис. 4) $b_1^{(m)}$ та $b_2^{(m)}$:

$$\begin{aligned} b_1^{(m)} &= 2(1 - \pi \Delta f) \cos 2\pi f_r^{(m)} \\ b_2^{(m)} &= -(1 - \pi \Delta f)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

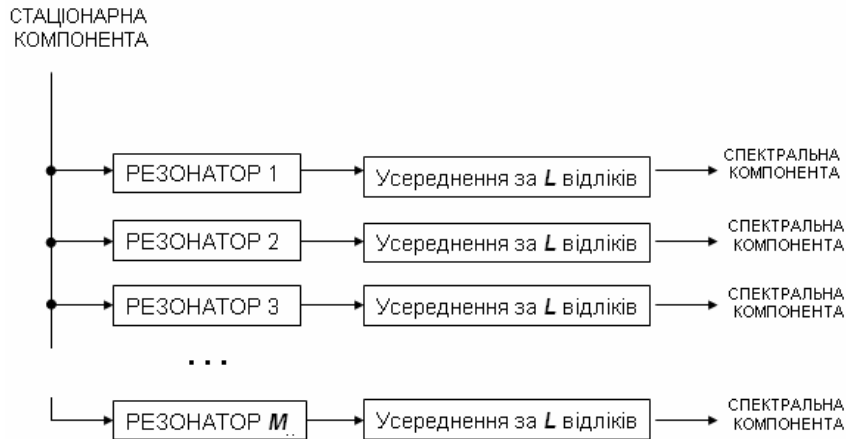


Рис. 3. - Структурна схема гребінки цифрових фільтрів для оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу

Коефіцієнт $b_2^{(m)}$ у виразі (4) залежить лише від ширини смуги пропускання фільтра Δf , а оскільки вона є однаковою для всіх фільтрів гребінки то можна записати $b_2^{(m)} = b_2 = const.$

Коефіцієнти прямого зв'язку $a_1^{(m)}$ та $a_2^{(m)}$ визначаємо з умови нормування фільтра

$|H(j2\pi f_r^{(m)})| = 1$, яку запишемо у розгорнутому вигляді:

$$\left| \frac{a_1^{(m)} e^{4j\pi f_r^{(m)}} + a_2^{(m)}}{e^{4j\pi f_r^{(m)}} - b_1^m e^{2j\pi f_r^{(m)}} - b_2} \right| = 1 \quad (5)$$

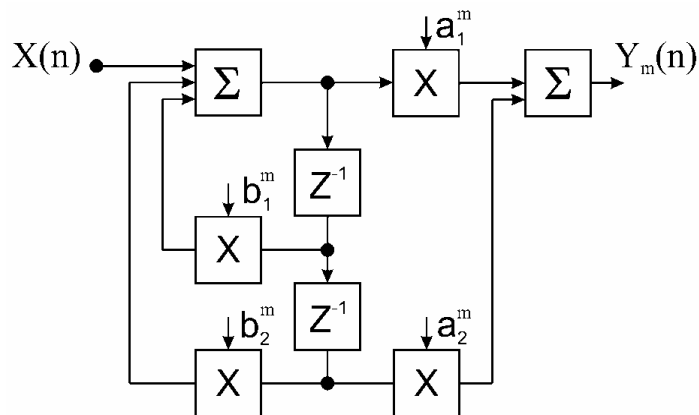


Рис. 4. - Структурна схема цифрового резонатора для оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу

Приймаючи $a_1^{(m)} = -a_2^{(m)} = a^{(m)}$ отримуємо:

$$a^{(m)} = \frac{\left| \begin{array}{cc} e^{4j\pi f_r^{(m)}} & -b_1^{(m)} e^{2j\pi f_r^{(m)}} \\ -b_1^{(m)} e^{2j\pi f_r^{(m)}} & -b_2 \end{array} \right|}{\left| \begin{array}{c} e^{4j\pi f_r^{(m)}} \\ +1 \end{array} \right|} \quad (6)$$

Обчислені за (6) значення коефіцієнтів $a^{(m)}$ не забезпечують нормування резонаторів з резонансними частотами близькими до 0 та 0,5 Гц. Для забезпечення нормування всіх резонаторів гребінки коефіцієнти $a^{(m)}$ обчислюємо за формулою яка є частковим випадком формули (6) при умові $f = 0,25$ та відповідно $b_1 = 2(1 - \pi \Delta f) \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$:

$$a_1 = -a_2 = \frac{\left| e^{j\pi} - b_2 \right|}{\left| e^{j\pi} + 1 \right|} \quad (7)$$

За формулами (9) та (12) для смуги приведених частот $[0;0,5]$ отримуємо гребінки фільтрів з амплітудо-частотними характеристиками, наведеними на рисунку 5.

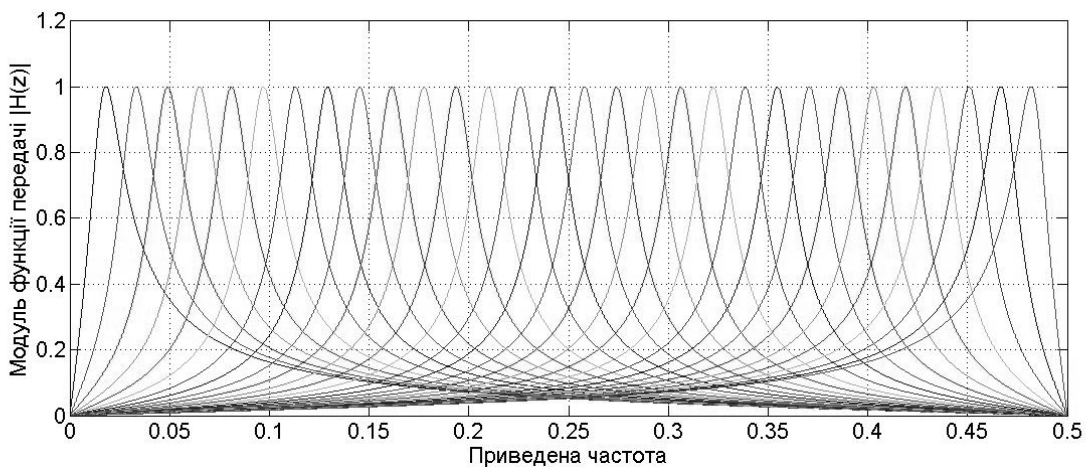


Рис. 5. - Амплітудо-частотна характеристика гребінки фільтрів

Розроблено алгоритм та програмного забезпечення для оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу з допомогою гребінок цифрових резонаторів.

Для верифікації розробленого програмного забезпечення використовуємо тестову імітаційну модель ритмокардіосигналу з дихальною варіабельністю [2]:

$$\xi_{RR}(n) = \frac{60}{P} + D \sin\left(\frac{2\pi n B}{P}\right) W(n) \quad (8)$$

де P – частота серцевих скорочень (уд./хв.), B – частота дихання (вдох/хв.), D – амплітуда дихальних хвиль, $W(n)$ – стаціонарна випадкова послідовність.

В четвертому розділі наведено результати комп'ютерного імітаційного моделювання нестационарного тестового ритмокардіосигналу та оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент фільтровим методом, когерентним методом та як стаціонарного випадкового процесу.

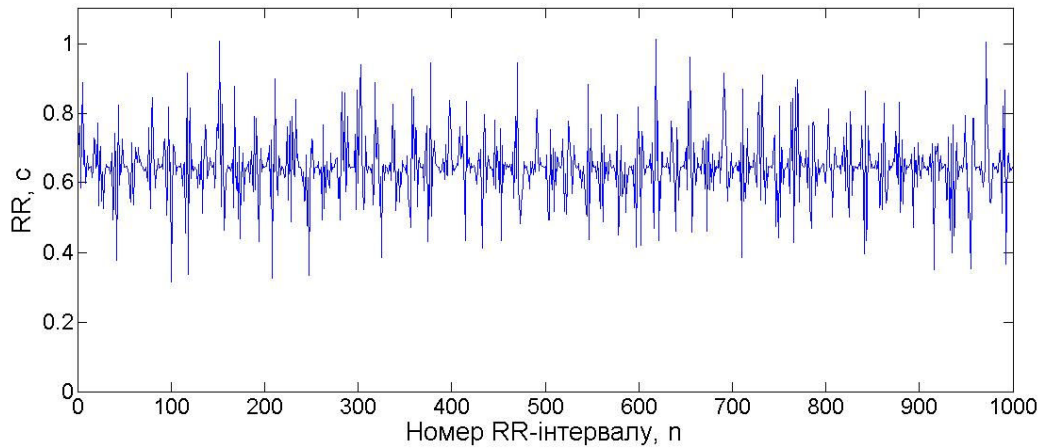


Рис. 6. - тестовий ритмокардіосигнал $\xi_k(n)$ з періодом корельованості $N_K = 21$ а)

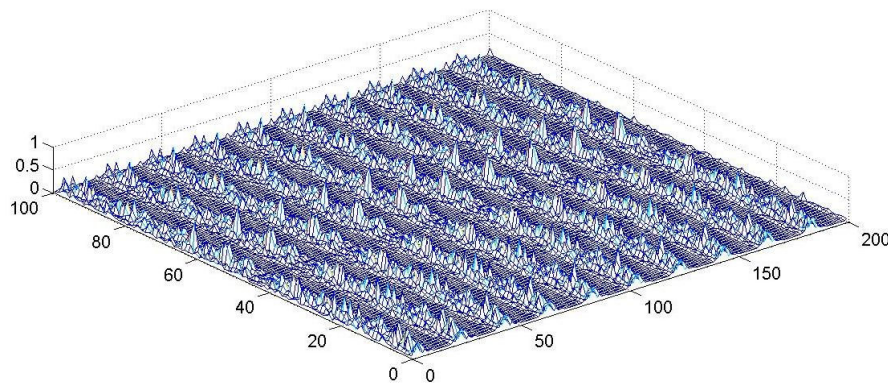


Рис. 7. - Оцінка спектральної густини потужності $S(n, \omega)$ стаціонарних компонент тестового ритмокардіосигналу $\xi_k(n)$ з періодом корельованості $N_K = 21$ фільтровим методом з допомогою гребінки цифрових резонаторів $M = 100, Q_B = 5$. Вісь абсцис – номер спектральної компоненти, вісь ординат – номер стаціонарної компоненти, вісь аплікату – спектральна густина потужності, $c^2/\text{Гц}$.

Для порівняльного аналізу результатів, отриманих при комбінуванні методів спектрального аналізу, застосовано систему показників, регламентованих у відповідних нормативних документах — імовірність P_F помилки, імовірність P_D вірогідного результату, поріг ν вибору рішення про вірогідність (МИ 187-86, 188-86. Методические указания. ГСИ. Достоверность и требования к методикам поверки средств измерений. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 39 с.).

Ідентифіковано параметри виразів із системи показників вірогідності для їх обчислення за компонентами спектральної густини потужності стаціонарних компонент РКС.

Отримані оцінки спектральної густини потужності стаціонарних компонент РКС отримані фільтровим методом (Рис. 7) порівняно із аналогічними оцінками отриманими з допомогою когерентного методу (Рис. 8) та оцінками СГП РКС як стаціонарного випадкового процесу (Рис. 9).

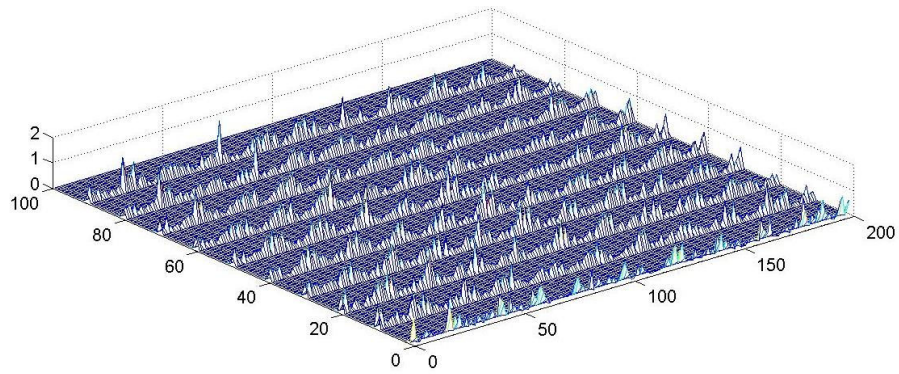


Рис. 8 – Оцінка СГП стаціонарних компонент тестового РКС когерентним методом. Вісь абсцис – номер спектральної компоненти, вісь ординат – номер стаціонарної компоненти, вісь аплікату – спектральна густина потужності, $\text{с}^2/\text{Гц}$.

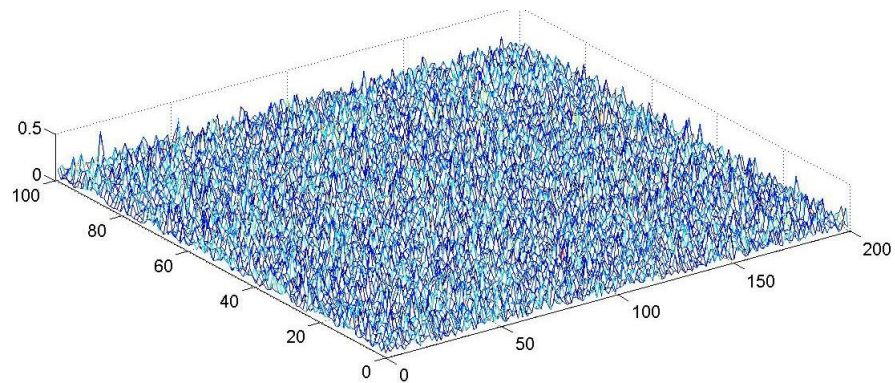


Рис. 9 – Оцінка СГП РКС як стаціонарного випадкового процесу. Вісь абсцис – номер спектральної компоненти, вісь ординат – номер відліку, вісь аплікату – спектральна густина потужності, $\text{с}^2/\text{Гц}$.

Для визначення імовірності P_D знайдено поріг v (тестову статистику для вибору рішення про адекватність методу). При цьому імовірність P_F вибрано з ряду значень (0.001; 0.01; 0.1). Поріг

$$v = \sqrt{\sigma_0} \Phi^{-1}(1 - P_F) + m_0, \quad (9)$$

де m_0 , σ_0 — відповідно, математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення усередненого значення спектральної густини потужності нестационарного тестового РКС. Тут Φ^{-1} позначено інтеграл імовірності, функцію обернену до $\Phi(x)$, яку реалізує функція MATLAB `norminv` (inverse of the normal cumulative distribution function).

Рішення про коректність оцінки спектральної густини потужності стаціонарних компонент РКС приймалися за критерієм Неймана-Пірсона, оскільки він має найбільшу потужність.

Пороги визначались для заданих імовірностей некоректної оцінки за ансамблем оцінок спектральної густини потужності стаціонарних компонент РКС

Імовірність P_D :

$$P_D = \Phi\left[\frac{v}{\sigma_1} - \left(m_1 + \sigma_1\right)\right], \quad (10)$$

де m_1 , σ_1 — відповідно, середні значення математичного сподівання і дисперсії оцінки спектральної густини потужності стаціонарних компонент РКС (для фільтрового та когерентного методів) чи оцінки спектральної густини потужності РКС.

На рис. 10 наведено типові графіки прогнозованої вірогідності оцінок спектральної густини потужності стаціонарних компонент РКС отриманих фільтровим та когерентним методами та типові графіки прогнозованої вірогідності оцінок спектральної густини потужності РКС як стаціонарного випадкового процесу.

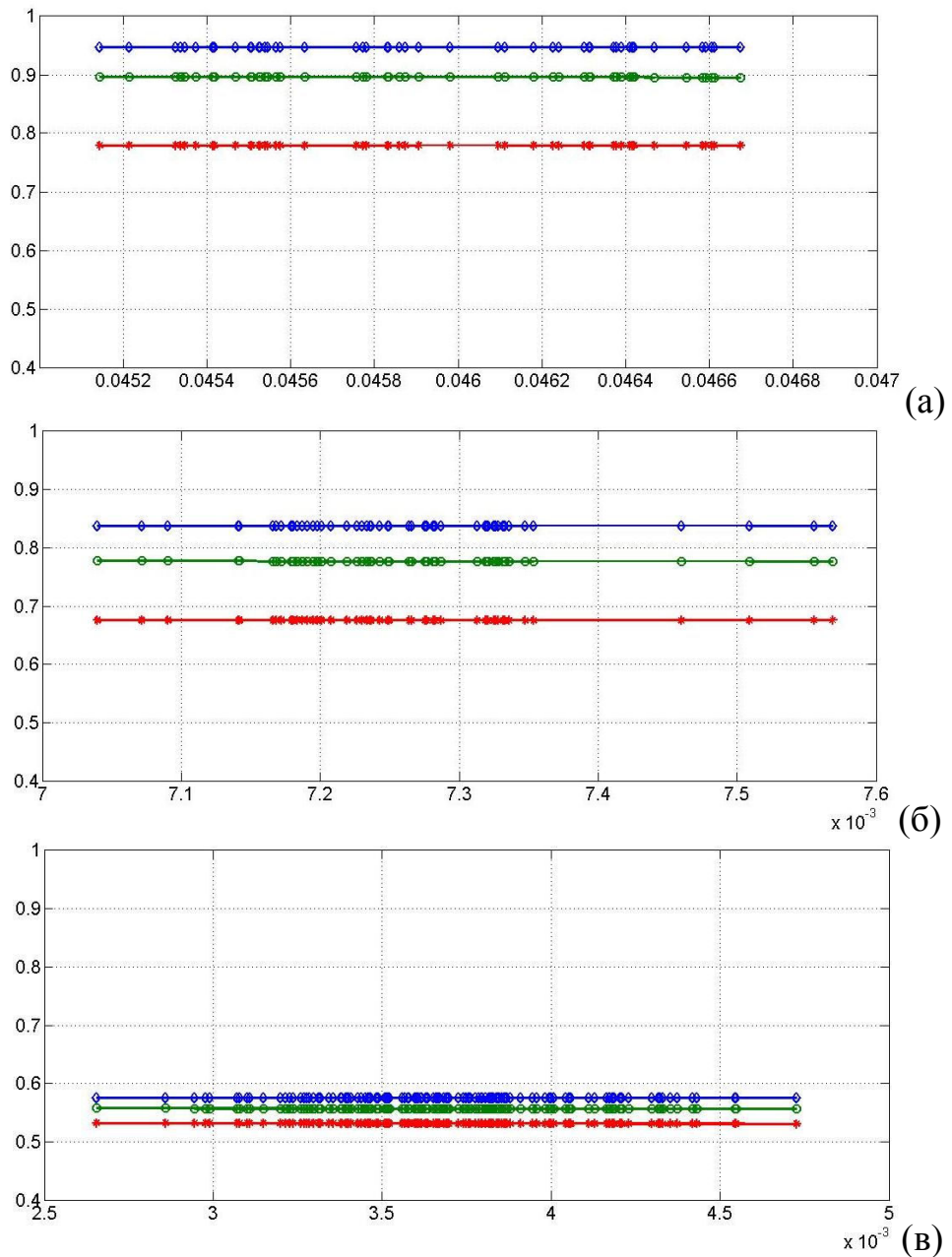


Рис. 10 - Типові графіки прогнозованої вірогідності оцінок спектральної густини потужності тестового нестационарного РКС при заданих імовірностях помилкової оцінки фільтровим методом (а), когерентним методом (б) та як стаціонарного ВП (в).* - $P_F=0,001$. \diamond - $P_F=0,01$. \circ - $P_F=0,1$. Вісь абсцис - $m_1 + \sigma_1$, c^2/Γ ц, вісь ординат - P_D .

Також в четвертому розділі дисертації проведено оцінювання обчислювальної складності компонентного, когерентного та фільтрового методів. Для цього з допомогою системи MATLAB проведено імітаційне моделювання роботи даних алгоритмів та оцінено час їх виконання для різних значень кількості спектральних складових РКС. Результати експерименту приведено на рис. 11.

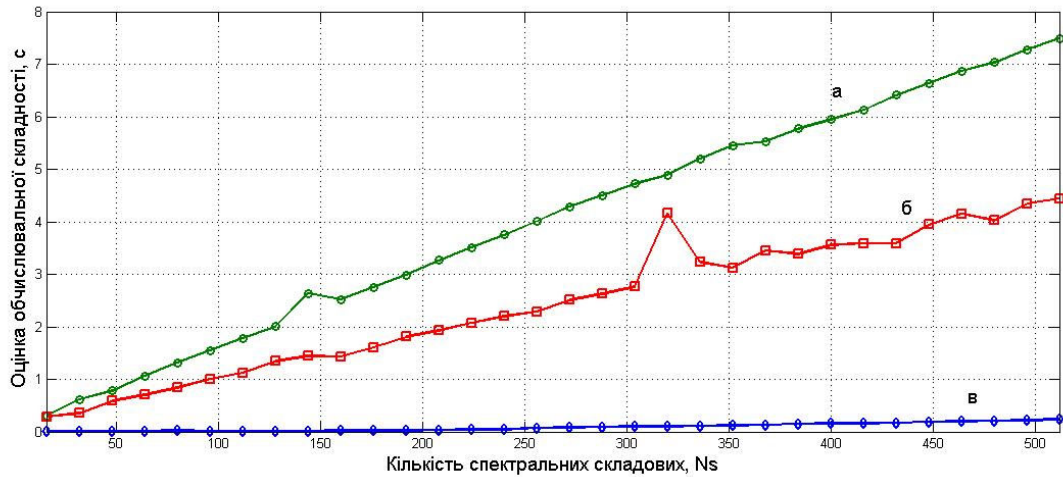


Рис. 11 – Результати вимірювання часу оцінювання СГП стаціонарних компонент РКС компонентним (а), когерентним (б) та фільтровим (в) методами

Як видно з графіків на рис. 11 на оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент РКС фільтровим методом було затрачено найменшу кількість машинного часу в порівнянні з компонентним та когерентним методами, що свідчить про меншу його обчислювальну складність. Експеримент було проведено з використанням персонального комп'ютера Acer Aspire 5715Z на базі процесора Intel Pentium Dual Core T2370 з тактовою частотою 1,73 ГГц.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу удосконалення обчислювальних методів обробки ритмокардіосигналу в системах контролю функціонального стану людини. При цьому отримано такі наукові та практичні результати

1) Аналіз існуючих систем контролю функціонального стану людини за серцевим ритмом показав, що оцінювання характеристик РКС проводять відомими методами з припущенням, що РКС є стаціонарним випадковим процесом, що при реальній нестаціонарності його. Це призводить до того, що оцінки спектральної густини ритмокардіосигналу мають дуже велику дисперсію, яка зростає зі збільшенням статистики, що свідчить про низьку достовірність застосованих методів оцінювання спектральної густини.

Адекватною математичною моделлю нестаціонарного РКС є модель ПКВП. Для оцінювання спектральної густини стаціонарних компонент ритмокардіосигналу як ПКВП розроблено та застосовують два методи: компонентний та когерентний. Обидва методи призначені для аналізу короткотривалих відрізків РКС та мають високу обчислювальну складність при довготривалому аналізі, чим значно ускладнюється їх застосування при роботі в режимі реального часу. Фільтровий метод на відміну від компонентного та когерентного є параметричним, що

ускладнює його застосування при аналізі коротких реалізації РКС та завдяки пам'яті фільтрів має суттєві переваги при роботі в режимі реального часу.

2) Обґрунтовано застосування високодобротних цифрових резонаторів для оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу фільтровим методом та визначено необхідні параметри для побудови засобів оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент РКС, що дало змогу удосконалити метод розрахунку коефіцієнтів прямих та зворотних зв'язків високодобротних цифрових резонаторів.

3) Удосконалено метод розрахунку коефіцієнтів прямого та зворотного зв'язку резонаторів шляхом введення умови нормування резонаторів за шириною смуги пропускання та модулем функції передачі чим забезпечено врахування параметрів фільтрового методу, що уможливило побудову гребінок цифрових резонаторів в заданому діапазоні частот з однаковою структурою та різними параметрами для оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу фільтровим методом.

4) Розроблено алгоритм та програмне забезпечення для оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу з допомогою гребінок цифрових резонаторів, що уможливило отримання оцінок спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу фільтровим методом при в 10 разів меншій обчислювальній складності порівняно з компонентним та когерентним методами.

5) Встановлено, що оцінки спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу отримані фільтровим методом, мають вірогідність на 0,2116 вищу при імовірності помилки 0,1, на 0,3017 вищу при імовірності помилки 0,01 та на 0,3411 вищу при імовірності помилки 0,001 в порівнянні з оцінками спектральної густини потужності того ж ритмокардіосигналу, отриманими відомими методами як для стаціонарного випадкового процесу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бачинський М.В. Фільтровий метод визначення параметрів варіабельності серцевої ритміки. / М.В. Бачинський, Ю.З. Лещинин, В.В. Фалендиш. // Вісник Хмельницького національного університету.- 2006. — т.1.- №5. — С. 182-188.
2. Яворський Б.І. Достовірність віддаленого мобільного автоматизованого голтерівського моніторингу кардіоритмосигналу. / Б. Яворський., М. Бачинський; В. Фалендиш. // Вісник ТДТУ. — 2009. — Том 14. — №2.— С. 124-129. — (математичне моделювання. математика. фізика).
3. Фалендиш В.В. Засоби оцінювання спектральної густини потужності нестационарного серцевого ритму в системах автоматичного контролю функціонального стану людини / В. Фалендиш // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – Том 16. - №3. – С. 217-227.
4. Фалендиш В.В. Обчислювальна складність алгоритмів оцінювання спектральної густини потужності ритмокардіосигналів. / Фалендиш В.В.- // Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць.- Київ: Міжнар. наук.-навч. центр інформ. технологій та систем НАН та МОН України.- Вип. 3.- 2011.- С. 235-244.
5. Фалендиш В. Частотні та часові характеристики цифрових фільтрів для

- оцінювання спектральної густини потужності ритмокардіосигналу фільтровим методом у системах контролю функціонального стану людини / М. Бачинський, В. Фалендиш // Вісник НУ «Львівська політехніка». Збірник наукових праць.- № 719.- Комп'ютерні науки та інформаційні технології.-2011.- С. 82-88.
6. Bachynskyy M. Determination of parameters of heart rate variability by a filter method. / Mychaylo Bachynskyy, Bohdan Yavorskyu, Volodymyr Falendysh, Yuriy Leschyshyn. // Proceedings of the International Conference TCSET'2006.- February 28-March 4, 2006, Lviv-Slavsko, Ukraine. — P. 638-640.
 7. Фалендиш В.В. Застосування фільтрового методу для визначення параметрів варіабельності серцевої ритміки. / В. Фалендиш, М. Бачинський. // Матеріали десятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.- Тернопіль, 17-18 травня 2006р.- Тернопіль: ТДТУ.- 2006. – С. 314.
 8. Фалендиш В.В. Врахування перехідних процесів фільтрів при аналізі нестационарної варіабельності серцевої ритміки фільтровим методом. / Фалендиш В.В., Бачинський М.В. // Зб. матеріалів форуму „Радіоелектроніка і молодь у ХХІ ст.”.- Харків: ХНУРЕ.- 2007.- ч.1.- С.434.
 9. Bachynskyy M. Determination of Parameters of Filter Method of Heart Rate Variability Analysis. / Myhaylo Bachynskyy, Bohdan Yavorskyu, Volodymyr Falendysh. // Proceedings of the IX-th International Conference CADSM'2007. - February 20-24.- 2007.- Lviv-Polyana, Ukraine. - P. 96-97.
 10. Фалендиш В.В. Система автоматичного контролю функціонального стану людини за серцевим ритмом / М.В. Бачинський, В.В. Фалендиш, Б.І. Яворський // VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція "Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів": тези наукових доповідей. - Кременчук: КДУ імені Михайла Остроградського, 2009. - С. 340.
 11. Фалендиш В.В. Оцінювання спектральних характеристик нестационарного серцевого ритму / М.В. Бачинський, В.В. Фалендиш, Б.І. Яворський // Материалы Десятой Международной научно-практической конференции СИЕТ-2009, 18-22 мая 2009. - Одеса: ОНПУ, 2009. - Т.2. - С. 180.
 12. Falendysh V. Digital Filters for Power Spectral Density Estimation of Heart Rhythm / Mykhaylo Bachynskyy, Volodymyr Falendysh, Bohdan Yavorskyu // Proceedings of the X International Conference TCSET'2010.- February 23-27, 2010. - Lviv-Slavsko, Ukraine. – 280 p.
 13. Фалендиш В.В. Оцінювання функціонального стану людини за варіабельністю серцевого ритму / М.В. Бачинський, В.В. Фалендиш, Б.І. Яворський // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: Зб. тез доповідей МНПК.- 19-21 травня 2010р. - Вінниця: ВНТУ.- 2010. - С. 462-463.
 14. Фалендиш В.В. Засоби цифрової фільтрації для оцінювання спектральних характеристик нестационарного серцевого ритму. / Фалендиш В.В., Яворський Б.І., Бачинський М.В. // Матеріали Першого всеукраїнського з'їзду “Медична та біологічна інформатика і кібернетика”. - Київ. - 23-26 червня 2010р.
 15. Фалендиш В.В. Тестова імітаційна модель ритмокардіосигналу з перехідним процесом при засинанні людини. / М.В. Бачинський, В.В. Фалендиш // Природничі науки та інформаційні технології: матеріали XIV наукової

АНОТАЦІЯ

Фалендиш В.В. Удосконалення обчислювальних методів обробки ритмокардіосигналу в системах контролю функціонального стану людини. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).- Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2012.

У дисертаційній роботі вирішене важливе наукове завдання, яке полягає в спеціалізації фільтрового методу оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу з метою врахування особливостей як самого сигналу так і задачі оцінювання спектральної густини потужності його стаціонарних компонент в системах контролю функціонального стану людини.

Обґрунтовано нове застосування фільтрового методу оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу в системах контролю функціонального стану людини, який розвинуто на основі відомої моделі нестационарного ритмокардіосигналу – періодично корельованій випадковій послідовності.

Проведено параметричну ідентифікацію фільтрового методу для задачі оцінювання спектральної густини потужності ритмокардіосигналу завдяки чому удосконалено метод розрахунку гребінок цифрових резонаторів для забезпечення нормування резонаторів за модулем функції передачі та шириною смуги пропускання і кратності резонансних частот періоду корельованості ритмокардіосигналу.

На основі удосконаленого методу розрахунку гребінок цифрових резонаторів розроблено алгоритм та програмні засоби оцінювання спектральної густини потужності стаціонарних компонент ритмокардіосигналу комп'ютерної реалізації.

Ключові слова: функціональний стан людини, ритмокардіосигнал, періодично корельована випадкова послідовність, стаціонарні компоненти, спектральна густина потужності, фільтровий метод, високочастотний цифровий фільтр, вірогідність, достовірність, комп'ютерне імітаційне моделювання, обчислювальна складність.

АННОТАЦИЯ

Фалендыш В.В. Усовершенствование вычислительных методов обработки ритмокардиосигнала в системах контроля функционального состояния человека. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 - Математическое моделирование и вычислительные методы (технические науки) .- Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2012.

В диссертационной работе решена важная научная задача, которая заключается в специализации фильтрового метода оценивания спектральной

плотности мощности стационарных компонент ритмокардиосигнала с целью учета особенностей как самого сигнала так и задачи оценивания спектральной плотности мощности его стационарных компонент в системах контроля функционального состояния человека.

Обосновано новое применение фильтрового метода оценивания спектральной плотности мощности стационарных компонент ритмокардиосигнала в системах контроля функционального состояния человека, который развит на основе известной модели нестационарного ритмокардиосигнала - периодически коррелированные случайном порядке.

Проведено параметрическую идентификацию фильтрового метода для задачи оценивания спектральной плотности мощности ритмокардиосигнала благодаря чему усовершенствованы метод расчета гребенок цифровых резонаторов для обеспечения нормирования резонаторов по модулю функции передачи и шириной полосы пропускания и кратности резонансных частот периода коррелированности ритмокардиосигнала.

На основе усовершенствованного метода расчета гребенок цифровых резонаторов разработан алгоритм и программные средства оценки спектральной плотности мощности стационарных компонент ритмокардиосигнала компьютерной реализации.

Ключевые слова: функциональное состояние человека, ритмокардиосигнал, периодически коррелированная случайная последовательность, стационарные компоненты, спектральная плотность мощности, фильтровый метод, высокочастотных цифровой фильтр, вероятность, достоверность, компьютерное имитационное моделирование, вычислительная сложность.

ABSTRACT

Falendysh V.V. Improvement of computational methods of processing a rhythmocardiosignal in human functional state control systems. - Manuscript.

Thesis for the degree of Ph.D. in the specialty 01.05.02 - Mathematical modeling and computational methods (technical sciences) .- Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, 2012.

The thesis resolved important scientific task that is specialized filter evaluation method power spectral density of stationary component periodically correlated random order to assess the power spectral density of stationary component rhythmocardiosignal systems control the human functional state in order to accommodate non-stationarity of rhythmocardiosignal and the need to use the method in real time mode.

A review of the methods and means of evaluation of power spectral density rhythmocardiosignal, bringing found that in measuring the spectral characteristics rhythmocardiosignal systems control the functional state of human well-known methods of his assumption of stationarity, spectral estimates have high variance, which increases with the statistics. This indicates a low reliability evaluation methods of the spectral density rhythmocardiosignal a stationary random sequence.

Adequate mathematical model of unsteady rhythmocardiosignal model is periodically correlated stochastic sequence (PCSS). For evaluation of the spectral density of stationary component rhythmocardiosignal as PCSS developed and used two methods:

component and coherent. Both methods use the Fourier transform of the autocorrelation function of parametric rhythmocardiogram and differ only way to build the last and designed for the analysis of short-term segments of rhythmocardiogram and have high computational complexity in long-term analysis and were difficult to use when working in real time mode. Filter method in contrast to the coherent and component methods does not require construction of autocorrelation functions and Fourier transform and for evaluation of power spectral density of rhythmocardiogram uses high-Q comb filters, which complicates its use in the analysis of short segments of rhythmocardiogram and through filter memory has significant advantages in work in real time mode.

A parametric identification of the filter method of estimation power spectral density of stationary component of rhythmocardiogram, namely defined frequency range to calculate filters combs, the dependence of the resonance (central) frequency of correlation period of rhythmocardiogram. A synthesis of the structure of power spectral density estimation of stationary component rhythmocardiogram, are expressions for the estimation of bandwidth, resolution, averaging time and statistical errors of estimation of power spectral density rhythmocardiogram with filter method by using second order digital resonators.

As a result of parameter identification filter method revealed the need to improve the method of calculating the coefficients of direct and feedback high-Q digital resonators to ensure the performance requirements of resonators comb to the parameters of filter method.

A new normalization condition resonators comb on which module of transfer function of the resonator at its resonant frequency taken equal to 1 for all resonators in comb than improved method for calculating the coefficients of direct and feedback resonator that ensures standardization of cavities per module transfer function and wide bandwidth. This enabled the construction of normalized combs of digital resonators in a given range of frequencies for estimating power spectral density of stationary component of rhythmocardiogram with filter method.

The algorithm and software for estimating power spectral density of stationary component rhythmocardiogram with combs of digital resonators that allowed a guest power spectral density of stationary component rhythmocardiogram filter method.

To verify the developed algorithm and software and comparing it with existing analog (component, coherent method and evaluation of power spectral density as a stationary random process) conducted computer simulation in which found that the computational complexity of the filter method compared to the component and coherent methods is about 10 and 20 times lower, respectively. Also conducted assessment of the reliability of the above methods for assessing power spectral density rhythmocardiogram means of statistical theory of choice-making. Estimation showed that filter method is 12% higher reliability than coherent method and 34% higher reliability in comparison with the methods of evaluating the spectral density rhythmocardiogram a stationary random process with probability of error 0.001.

Keywords: functional status of human rhythmocardiogram periodically correlated random sequence, stationary components, power spectral density, filter method, high-Q digital filter, probability, reliability, computer simulation, computational complexity.