

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ЛЕЩИШИН ЮРІЙ ЗІНОВІЙОВИЧ

УДК 621.391.7:612.172.2

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИ ЕФЕКТИВНОГО ВИЗНАЧЕННЯ
РОЗЛАДКИ РИТМОКАРДІОСИГНАЛУ**

01.05.02 — *математичне моделювання та обчислювальні методи*

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2013

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор

Яворський Богдан Іванович,

Тернопільський національний технічний університет

імені Івана Пулюя, завідувач кафедри біотехнічних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Бойко Іван Федорович,

Національний авіаційний університет, професор кафедри електроніки, м. Київ;

доктор фізико-математичних наук, професор

Яворський Ігор Миколайович,

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН

України, провідний науковий співробітник лабораторії вібродіагностики, м. Львів.

Захист відбудеться “__” _____ 2013 р. о __ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради **К 58.052.01** у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

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

Автореферат розіслано “__” _____ 2013 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради К 58.052.01

Шелестовський Б. Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Важливою характеристикою серцевого ритму є зміна тривалості RR інтервалів — варіабельність серцевого ритму, що спричинена симпатичною, парасимпатичною і гуморальною регуляцією, яка відображає пристосування організму до зміни умов середовища. Аналіз варіабельності серцевого ритму використовують для раннього діагностування серцево-судинних та інших захворювань, стійкості при функціональних тестах та визначення профпридатності машиністів потягів, операторів АЕС тощо. Інформативними є статистичні та спектральні параметри варіабельності РКС. Варіабельність розглядають як параметр ритмокардіосигналу (РКС), який отримують з електрокардіосигналу (ЕКС) вимірюванням RR інтервалів послідовних циклів серцевих скорочень (Парін В.В., Баєвський Р.М.). Реєстрація РКС відбувається в умовах клініки або повсякденної діяльності пацієнта (тривалістю в кілька діб — голтерівський моніторинг) з подальшим оцінюванням його параметрів, що вимагає опрацювання значних обсягів даних, а відповідно потребує автоматизації реєстрації та аналізу РКС, що реалізуються у відповідних системах голтерівського моніторингу (ГМ) (Medilog (Oxford, Великобританія), DiaCard (Сольвейг, Україна), CardioSens (ХАІ, Україна), Кардіотехніка-4000 (ИНКАРТ, Росія)).

Проте в існуючих системах при оцінюванні параметрів варіабельності РКС припускають його стаціонарність. А нелінійності і взаємодії системи регуляції серцевого ритму призводять до застосування близько 20-параметричної його моделі (Баєвський Р.М., Яблучанський М.І.). Однак зміна фізичного навантаження, фізіологічного стану людини та чинники навколишнього середовища (Соболев А.В.) викликають різку зміну кореляційних зв'язків РКС — розладку (нестаціонарними є більше 21% відрізків РКС для денного запису і понад 5% — для нічного (Мартиненко А.В., Яблучанський М.І.)). Це призводить до зменшення вірогідності оцінок параметрів варіабельності РКС через неврахування впливу зовнішнього середовища (Хаяутін В.М.) або ускладнення апаратури застосуванням, крім стандартних (статистичних і спектральних), різних методів спектрального аналізу (Рагозін А.Н., Yamamoto Y.), методів теорії хаосу (Elbert Th.) та ін. Підвищення вірогідності оцінок параметрів варіабельності РКС вимагає застосування методів оцінювання оптимальних до моделі РКС на стаціонарних і нестаціонарних відрізках, а відповідно визначення їх меж, викликаних розладкою РКС. Також при функціональних тестах важливим є визначення часу появи розладки й тривалість нестаціонарного відрізка РКС, викликаного тестом (Сапова Н.І., Березний Е.А.). Для автоматизації визначення розладки РКС необхідно побудувати математичну модель РКС, що враховує розладку, та розробити методи її визначення.

На сьогодні важливим науковим завданням є побудова математичної моделі РКС та розроблення методів достовірного визначення його розладки для підвищення вірогідності автоматичного оцінювання параметрів варіабельності РКС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження дисертаційної роботи проводились у відповідності до тематичних

планів науково-дослідницьких робіт кафедри біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Окремі результати отримано при виконанні наукових тем ВК 5-01 "Дослідження і розробка методів та засобів обробки евентуальних, циклічних та ритмічних біосигналів", номер держ. реєстрації 0101 U 007912 та ВК 20-06 "Дослідження методів та засобів виявлення евентуальних, циклічних та ритмічних біосигналів", номер держ. реєстрації 0106 U 002062. У цих роботах автор брав участь як виконавець і розробив метод автоматичного визначення розладки РКС.

Мета і задачі дослідження. *Метою дослідження є побудова математичної моделі та методів ефективного визначення розладки РКС для підвищення вірогідності автоматичного оцінювання параметрів варіабельності РКС у системах ГМ.*

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі задачі:

- проаналізувати відомі математичні моделі РКС та методи оцінювання параметрів його варіабельності, методи визначення розладки сигналів для вибору напрямку дослідження;
- побудувати математичну модель РКС, що враховує розладку;
- розробити критерій визначення розладки РКС;
- обґрунтувати й застосувати інваріантне до зсуву спектральне представлення РКС для обчислення тестової статистики визначення розладки РКС за побудованим критерієм;
- обґрунтувати та розробити критерій для адаптації параметрів методів обчислення тестової статистики визначення розладки РКС для підвищення достовірності визначення його розладки;
- побудувати критерій ефективності методів визначення розладки РКС для вибору достовірнішого з них;
- обґрунтувати вибір алгоритму й розробити програмне забезпечення для визначення розладки РКС;
- провести комп'ютерне моделювання методів визначення розладки РКС для верифікації математичної моделі та оцінювання характеристик достовірності визначення розладки РКС.

Об'єкт дослідження — процес визначення розладки ритмокардіосигналу.

Предмет дослідження — математична модель та методи визначення розладки ритмокардіосигналу.

Методи дослідження. При розв'язанні поставлених задач використано методи: енергетичної теорії сигналів і систем (ЕТСС) — для розроблення математичної моделі РКС із розладкою; статистичної теорії вибору рішень для розроблення критерію визначення розладки РКС; спектрально-кореляційної теорії випадкових сигналів — для отримання тестової статистики визначення розладки РКС; імітаційного моделювання для оцінювання достовірності визначення розладки РКС.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Уперше побудовано математичну модель РКС із розладкою, яка відрізняється від відомих тим, що враховує зміну РКС зі стаціонарної до

періодично корельованої випадкової послідовності, що уможливило розроблення критерію визначення розладки РКС.

2. Уперше отримано тестову статистику визначення розладки РКС шляхом застосування спектрального представлення РКС, що уможливило побудову методу визначення розладки, що на відміну від інших є інваріантним до моменту відбору сигналу.

3. Адаптовано статистичний критерій перевірки гіпотез Неймана –Пірсона до задачі визначення розладки РКС, що уможливило виявлення розладки з подальшим визначенням часового моменту її настання.

4. Уперше розроблено метод визначення розладки РКС шляхом застосування адаптованого статистичного критерію Неймана –Пірсона до тестової статистики, отриманої за спектральним представленням РКС, що уможливило достовірне визначення його розладки.

5. Набуло подальшого розвитку використання варіації спектральних компонент РКС за критерій оптимальності параметрів синфазного методу отримання тестової статистики та вибору віконної функції, що уможливило їх застосування та підвищило достовірність визначення розладки РКС.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані теоретичні результати розширюють область застосування спектрально-кореляційних методів аналізу РКС. Це уможливлює автоматичне визначення розладки РКС, що спрощує апаратуру та підвищує вірогідність автоматичного оцінювання параметрів варіабельності РКС.

Розроблено алгоритм та програмне забезпечення для визначення розладки РКС із використанням пакета Matlab. Що автоматично визначає час появи розладки й тривалість нестационарного відрізка РКС, який використано для сегментації РКС на стаціонарні та нестационарні відрізки.

Розроблено програмне забезпечення для імітаційного моделювання тестових РКС та електрокардіосигналів із розладкою. Розроблено алгоритм визначення періоду корельованості для оптимального налаштування параметрів синфазного методу отримання тестової статистики та вибору віконної функції.

Розроблені у дисертації методи і програми для визначення розладки РКС упроваджено в:

— Науково-технічному центрі радіоелектронних пристроїв і технологій "ХАІ МЕДІКА" Національного аерокосмічного університету імені М.С. Жуковського "ХАІ" — алгоритм та програму для визначення розладки РКС та підвищення точності вимірювання медикобіологічних параметрів варіабельності серцевого ритму й вірогідності діагностування в системах ГМ;

— Тернопільській державній медичній академії ім. І. Я. Горбачевського на кафедрі нормальної фізіології — метод та програму визначення розладки РКС для підвищення точності вимірювання характеристик варіабельності серцевого ритму в наукових дослідженнях та практичних заняттях;

— Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя на кафедрі біотехнічних систем — пакет комп'ютерних програм із визначення розладки РКС для підготовки бакалаврів, спеціалістів і магістрів за

освітньо-професійним спрямуванням 6.0910 "Електронні апарати" за спеціальностями 7.091002, 8.091002 "Біотехнічні та медичні апарати і системи".

Особистий внесок. Основні результати, які відображають суть дисертаційної роботи, отримано автором самостійно. Особистий внесок здобувача в працях, опублікованих у співавторстві, такий: [1, 12] — обґрунтування та побудова методу обчислення тестової статистики та характеристик достовірності визначення розладки РКС за критерієм Неймана–Пірсона; [3] — обґрунтування застосування синфазного методу отримання спектральних компонент для оцінки параметрів РКС на базі його математичної моделі — періодично корельованої випадкової послідовності; [4, 6] — застосування формування двох потоків даних та побудова алгоритму виявлення RR інтервалів електрокардіосигналу для формування РКС, з метою визначення його розладки та автоматичного аналізу параметрів варіабельності РКС у системі голтерівського моніторингу; [5, 15-16] — розроблення математичної моделі та методу визначення розладки РКС, обчислення характеристик достовірності для тестових РКС із застосуванням синфазного методу отримання спектральних компонент; [7] — алгоритм та програмна реалізація методу визначення розладки РКС; [8, 9] — доцільність застосування існуючих та нових математичних моделей і методів автоматичного отримання інформації про параметри РКС; [10] — розроблення алгоритму синтезу тестових сигналів для оцінки достовірності визначення розладки РКС; [11] — ідентифікація параметрів інтеграла імовірності при визначенні розладки РКС за критерієм Неймана–Пірсона.

Апробація результатів дисертації. Окремі результати роботи апробовано на: 7-му Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.» ХНУРЕ (м. Харків, 2003 р.), 1-й Міжнародній конференції “Електроніка та прикладна фізика” КНУ ім. Т. Шевченка (м. Київ, 2005 р.), Міжнародних конференціях “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп’ютерної інженерії” TCSET’2006 (Львів-Славсько, 2006 р.) та TCSET’2008 (Львів-Славсько, 2008 р.), 9-й Міжнародній конференції “Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці” CADSM’2007 (Львів-Поляна 2007 р.), 11-й та 15-й наукових конференціях ТНТУ (м. Тернопіль, 2007 р. та 2011 р.), Всеукраїнській науковій конференції ТДТУ (м. Тернопіль, 2009 р.), 10-й Міжнародній конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп’ютерної інженерії” TCSET’2010 (Львів-Славсько, 2010 р.), на наукових семінарах кафедри біотехнічних систем ТНТУ ім. І. Пулюя (2002-2013 рр.).

У цілому робота обговорювалася у Національному університеті “Львівська політехніка” (2007 р.), Вінницькому національному технічному університеті (2011 р.), Інституті електродинаміки НАН України (м. Київ, 2013 р.), Фізико-механічному інституті ім. Карпенка НАН України (м. Львів, 2013 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 17 наукових праць, шість статей у наукових фахових виданнях [1-6], дві з них у журналах що внесені в науково метричну базу Inspec та одне авторське свідоцтво [7], 10 тез конференцій [8-17]. Праці [2, 12, 13, 16] написано без співавторів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох

розділів, висновку, викладених на 123 сторінках, списку літератури з 123 назв на 13 сторінках, додатків на 14 сторінках. Загальний об'єм — 150 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито суть і стан наукової задачі, обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і завдання, викладено основні положення, винесені на захист, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, вказано апробацію результатів роботи на конференціях, семінарах, висвітлення їх у друкованих працях.

У **першому розділі** наведено основні результати аналітичного огляду літератури та показано стан оцінювання параметрів варіабельності РКС при ГМ. Проаналізовано відомі моделі та методи оцінювання параметрів варіабельності РКС, виявлено факт зниження їх вірогідності через неврахування розладки РКС і встановлено, що застосування різних методів для оцінювання параметрів РКС унеможливорює їх автоматизацію та викликає ускладнення апаратури.

В результаті огляду систем відбору РКС зауважено, що існуючі методи оцінювання параметрів варіабельності РКС використовують статистичний і спектральний аналіз, базуючись на його стаціонарній моделі, що відображено в роботах (Баєвський Р.М., Рябікіна Г.В., Jasson S., Bianchi A.M.). Стаціонарність РКС можлива лише за умови, що дія механізмів регуляції ритму серця протягом реєстрації є постійною (стаціонарність умов спостереження). РКС не є стаціонарною випадковою послідовністю, оскільки система регуляції ритму серця адаптується до поточного стану організму та впливу зовнішнього середовища, що викликають розладку та нестационарність РКС (рис. 1).

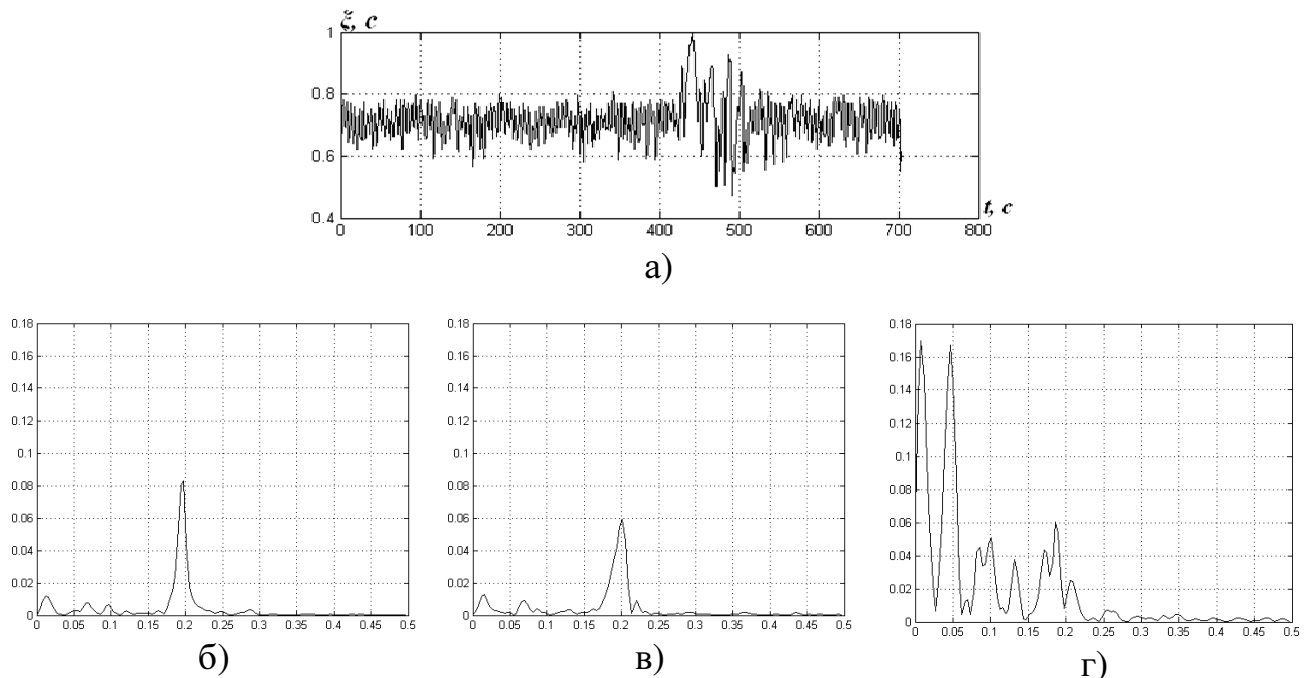


Рис.1 Перехідний процес, що викликає розладку РКС: а) послідовність RR інтервалів відібрана при стаціонарних умовах із наступною різкою зміною положення тіла; б) спектральна густина потужності РКС на відрізку 1:256 відліків; в) спектральна густина РКС на відрізку 145:400 відліків; г) спектральна густина РКС на відрізку 400:655 відліків

Це призводить до зниження вірогідності результатів оцінювання параметрів варіабельності РКС. Встановлено, що перехід від одного стійкого стану системи регуляції ритму серця до іншого (від стаціонарного до нестаціонарного) визначається розладкою РКС — різкою зміною кореляційних зв'язків, яка відбувається у невизначені наперед моменти часу, зумовлені випадковістю зміни фізіологічного стану організму людини.

Відомі нові математичні моделі для перехідного процесу РКС (Тиш Є.В.) та нестаціонарного РКС (Яворська Є.Б.) хоча і враховують стаціонарну модель, однак не зазначають часового моменту настання зміни статистичних характеристик РКС.

Отже, з метою підвищення точності та автоматизації оцінювання параметрів варіабельності РКС необхідно удосконалити його математичну модель шляхом врахування розладки та розробити методи її ефективного визначення з метою поділу РКС на стаціонарні та нестаціонарні відрізки і застосування до них відповідних методів оцінювання.

Розв'язання сформульованих у дисертації задач складає значний внесок у вирішення актуальної, практично важливої науково-технічної задачі — розроблення методів ефективного визначення розладки РКС.

У **другому розділі** наведено шляхи побудови критерію визначення розладки РКС. На основі апіорних відомостей про функції розподілу імовірностей появи розладки РКС побудовано функціонал відношення правдоподібності та обґрунтовано застосування статистичного критерію Неймана–Пірсона до задачі визначення розладки РКС.

Враховуючи, що РКС описують як стаціонарну випадкову послідовність, а розладка та часові моменти появи нестаціонарності є невідомими, розглянуто ритмокардіосигнал $\xi(t)$ як функцію стаціонарної випадкової послідовності $\eta(t)$ та періодичної функції $\zeta(t)$, що відображає хвилі РКС, викликані взаємодією симпатичної і парасимпатичної вегетативної нервової системи, що спостерігається скінченний часовий інтервал $[0, T]$

$$\xi(t) = F(\zeta(t), \eta(t)), \quad 0 \leq t \leq T,$$

де $F(\cdot)$ — оператор взаємодії нестаціонарного і стаціонарного РКС. Моменти часу є дискретними

$$t = m \Delta t,$$

де Δt — крок між RR інтервалами РКС, що дорівнює 1с., $m \in N$.

Якщо дія механізмів регуляції серцевого ритму протягом реєстрації залишається незмінною, тоді ці механізми протікають однорідно й отриманий РКС $\xi(t)$ (рис. 2), виражають на базі стаціонарної моделі

$$\xi(t) = \eta(t) = T_{RR} + n(t), \quad (1)$$

де $T_{RR} = \text{const}$ математичне сподівання періоду повторюваності R-зубців; $n(t)$ — стохастична складова (гаусова стаціонарна випадкова послідовність).

Нестаціонарність дії механізмів регуляції, пов'язана з впливом центральної і вегетативної нервової системи, насиченням крові киснем, стресами або

функціональними пробами зазвичай переноситься на поняття нестационарності РКС зі змінними у часі статистичними характеристиками. Така нестационарність може бути при зміні положення тіла або навантаження (заникаючою чи еволютивною), або внаслідок появи періодичних компонент, пов'язаних з диханням — періодичною зі зміною у часі кореляційних зв'язків.

Відомою математичною моделлю, що враховує нестационарність РКС (без урахування розладки), є періодично корельована випадкова послідовність (ПКВП) (Яворська Є.Б.). Тому розглянуто отриманий РКС $\xi(t)$ як ПКВП з математичним сподіванням $m_\xi(t)$ та кореляцією $r_\xi(t,s)$

$$m_\xi(t) = m_\xi(t + T_K), \quad r_\xi(t, s) = r_\xi(t + T_K, s + T_K), \quad (2)$$

де T_K — період корельованості ПКВП.

За наявності розладки модель РКС змінюється від стаціонарної (рис. 2) до періодично корельованої (рис. 3) — нестационарний, періодично корельований РКС, що змінює свої характеристики (рис. 4) у момент часу τ ,

$$\xi(t) = \eta(t) + \theta(t) \cdot \zeta(t), \quad \theta(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < \tau \\ 1, & \tau \leq t \leq T \end{cases}, \quad (3)$$

де $\theta(t)$ — індикаторна функція, що вказує на появу розладки РКС; τ — час появи розладки РКС.

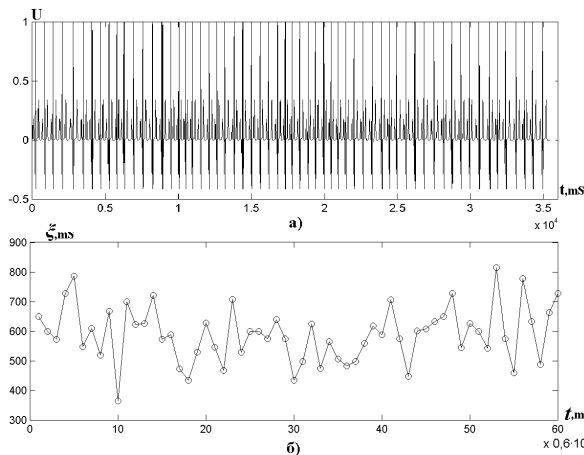


Рис. 2 Стаціонарний ЕКС (а) та його РКС (б)

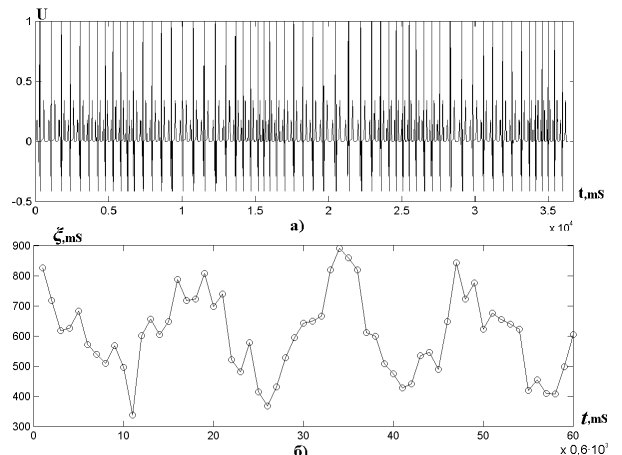


Рис. 3 Періодично корельований ЕКС (а) та його РКС (б)

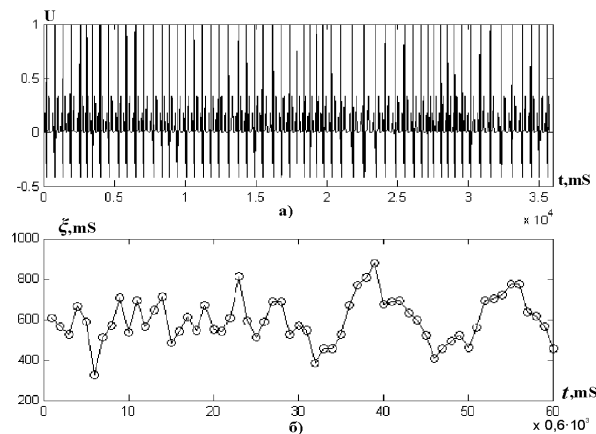


Рис. 4 Зміна статистичних характеристик ЕКС (а) та його РКС (б)

Для побудови критерію визначення розладки РКС покладемо, як прийнято в теорії статистичного вибору рішень, індикаторна функція $\theta(t)$ невідома, яка може набувати тільки одне з двох значень: $\theta(t)=0$ (стаціонарний РКС, подія H_0), $\theta(t)=1$ (поява розладки РКС, подія H_1). Важливим для побудови критерію є відсутність апіорної інформації про появу розладки РКС.

Побудова критерію визначення розладки базується на аналізі РКС у пристрої опрацювання даних (ПОД), який дає апіорну інформацію про функції розподілу значень стаціонарного РКС $W_0(q)$ (рис.5). А прийняття рішення про розладку РКС виконується за визначеним критерієм (блок прийняття рішення (БПР)), зокрема за критерієм Неймана – Пірсона, що використовується коли відсутня апіорна інформація про появу розладки РКС.

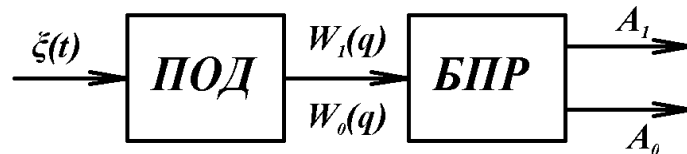


Рис.5 Структурна схема визначення розладки РКС: $\xi(t)$ — спостережуваний РКС; $W_0(q)$, $W_I(q)$ — густина розподілу імовірності тестової статистики q стаціонарного та ПКВП РКС при розладці на виході ПОД; БПР— блок прийняття рішення; A_0 або A_I — прийняте рішення про стаціонарність або розладку РКС

За критерієм Неймана – Пірсона та за густиною розподілу імовірності тестової статистики стаціонарного РКС на виході ПОД $W_0(q)$ задаємося умовною імовірністю помилкового визначення розладки РКС p_f (за відсутності розладки), що визначає втрати від прийняття неправильного рішення. І як зображено на рис.6, трактується як імовірність того, що значення тестової статистики $q(t)$ на виході ПОД перевищить деяке граничне значення порога h , що призведе до помилкового рішення про розладку РКС,

$$p_f = P[q(t) \geq h] = \int_h^{\infty} W_0(q) dq. \quad (4)$$

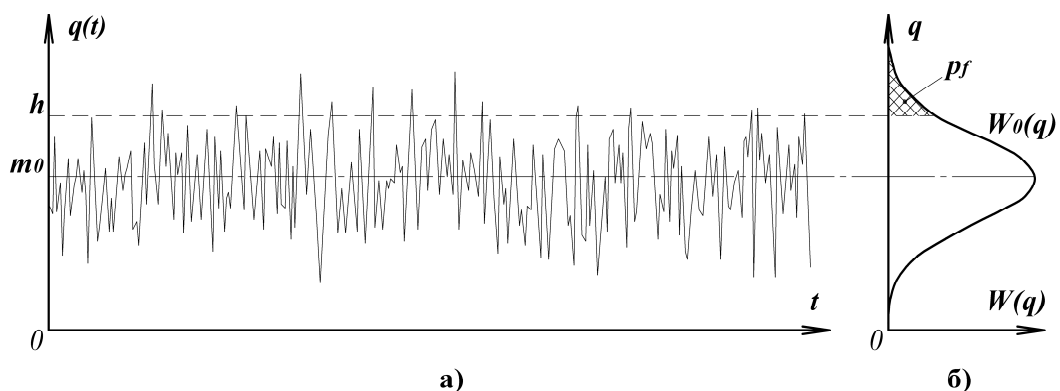


Рис. 6 Залежність імовірності помилкового визначення розладки РКС p_f від порога визначення h : а) тестова статистика визначення q ; б) густина розподілу $W(q)$ імовірності тестової статистики q

За густиною розподілу імовірності тестової статистики ПКВП РКС $W_I(q)$ розраховуємо імовірність правильного визначення розладки РКС p_d ,

$$p_d = P(H_1) \int_h^\infty W_1(q) dq. \quad (5)$$

Це трактується як імовірність того, що значення тестової статистики $q(t)$ на виході ПОД перевищить деяке граничне значення порога h (рис.7), і буде прийняте правильне рішення про розладку РКС,

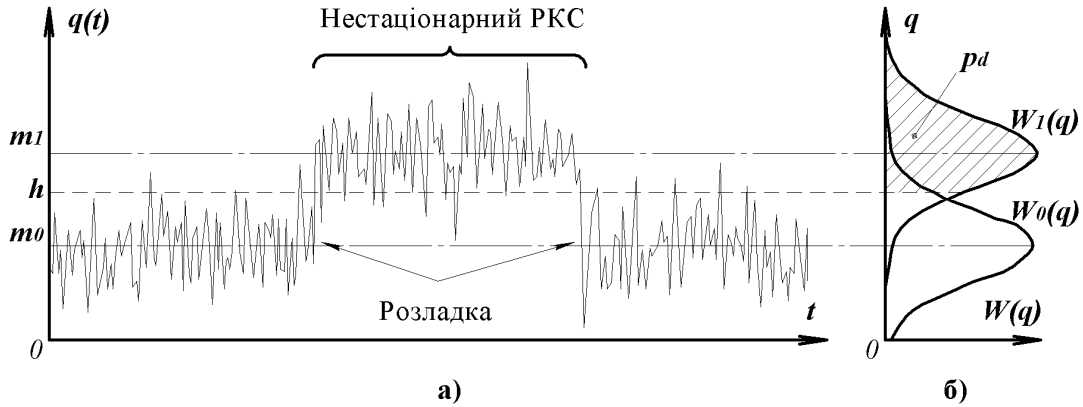


Рис. 7 Залежність імовірності правильного визначення розладки РКС p_d від порога визначення h : а) тестова статистика визначення q ; б) густина розподілу $W(q)$ імовірності тестової статистики q

Метод визначення розладки РКС базуватимемо на порівнянні з порогом h відношення правдоподібності

$$L = \left\{ \frac{W_1(q)}{W_0(q)} \right\} = \left\{ \frac{2}{N_0} \sum_{t=1}^N \xi(t) \cdot \zeta(t) \right\} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} h, \quad (6)$$

де, N_0 — одностороння спектральна густина потужності стаціонарного РКС.

При $\ln L > h$ приймається рішення про розладку РКС; якщо $\ln L < h$, то РКС є стаціонарним. Величина $\{\bullet\}$ з теорії виявлення сигналів є тестовою статистикою,

$$q(t) = \sum_{t=1}^N \xi(t) \cdot \zeta(t) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_2 \end{matrix} h. \quad (7)$$

За критерієм Неймана – Пірсона імовірність помилкового визначення розладки p_f задається, а імовірність правильного визначення розладки p_d визначаємо

$$p_f = 1 - \Phi\left(\frac{h - m_0}{\sqrt{D_0}}\right), \quad (8)$$

$$p_d = 1 - \Phi\left(\frac{h - m_1}{\sqrt{D_1}}\right), \quad (9)$$

де $\Phi(\bullet)$ — функція Гауса; m_0 , D_0 — математичне сподівання і дисперсія тестової статистики q при стаціонарному РКС; m_1 , D_1 — математичне сподівання і дисперсія тестової статистики q при розладці РКС.

За заданою імовірністю помилкового визначення p_f визначаємо пороговий рівень h .

$$h = \sqrt{D_0} \Phi^{-1}(1 - p_f) + m_0. \quad (10)$$

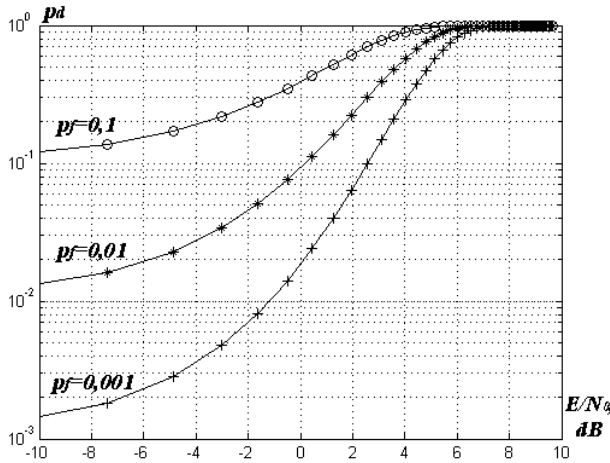


Рис. 8. Характеристики достовірності визначення розладки РКС

У такий спосіб розраховано характеристики визначення розладки РКС (рис. 8) для різних імовірностей помилкового визначення.

Характеристики достовірності визначення розладки РКС являють собою залежність імовірності правильного визначення розладки p_d від відношення $\sqrt{2E/N_0}$ при фіксованій імовірності помилкового визначення p_f .

Для отримання тестової статистики визначення розладки використано спектральне представлення РКС, що не залежить від часового моменту відбору. Його отримують розкладом сигналу

$$\hat{\xi}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_k e^{-j\lambda_k t}, \quad (11)$$

де, $\{\alpha_i\}$ — спектр; $e^{-j\lambda_k t}$ — власні функції лінійного оператора зсуву у часі кореляційного оператора. Спектральне представлення РКС уможливлює застосування для обчислення тестової статистики відомих методів аналізу ПКВП, зокрема синфазного методу. Тоді тестову статистику визначення розладки РКС отримуємо шляхом перетворення Фур'є:

$$\hat{q}(t, \lambda) = \sum_{u=0}^{N-1} b(t, u) e^{-ju\lambda}, \quad (12)$$

де $b(t, u)$ — параметрична коваріація РКС, отримана на скінченному відрізку часу довжиною в N_K періодів корельованості,

$$\hat{b}(t, u) = \frac{1}{N_K} \sum_{k=0}^{N_K-1} \xi(t+u+kT) \overline{\xi(t+kT)}. \quad (13)$$

За отриманим критерієм визначення розладки РКС (6) аналізуємо, чи в РКС відбулась розладка. Для її визначення розділимо РКС на w відрізків — ковзним вікном фіксованої тривалості w_S відліків із зсувом w_i (рис. 9), кожен з яких перевіримо на появу розладки за побудованим критерієм (6). Точка розладки РКС τ буде визначатися сумою $\tau = t_S + w_S$, де t_S — тривалість РКС без розладки.

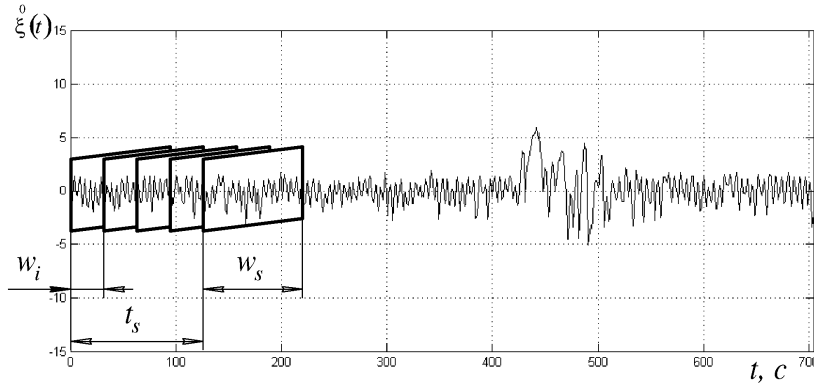


Рис. 9. Послідовне визначення розладки РКС із застосуванням ковзного вікна фіксованої тривалості w_s

Тривалість вікна w_s визначаємо з умови незмінності фізіологічних механізмів, що зумовлюють варіабельність РКС за хвилинний проміжок часу та зручності обчислення швидкого перетворення Фур'є $w_s=64$ відліки. Для вищої точності визначення розладки РКС задамо мінімальний зсув вікна $w_i=1$ відлік.

Таким чином, розроблена математична модель РКС із розладкою, уможливила коректне формулювання задачі її визначення. А застосування статистичного критерію Неймана–Пірсона та спектрального представлення РКС уможливило побудову критерію визначення розладки РКС.

У **третьому розділі** дисертації побудовано методи, алгоритми та програмне забезпечення визначення розладки РКС, а також обчислення тестової статистики визначення розладки. Обґрунтовано та побудовано критерій адаптації параметрів цифрового спектрального аналізу та віконної функції для підвищення достовірності визначення розладки РКС.

За тестовими статистиками (12) оцінено математичне сподівання m_0 , m_1 та дисперсію D_0 , D_1 при стаціонарному РКС та при появі розладки.

$$m_0 = \frac{1}{w} \sum_{n=1}^w q_{\eta}(t_l, \lambda_k, w_n), \quad (14)$$

$$m_1 = \frac{\frac{1}{MN} \left(\sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^N q_{\xi}(t_l, \lambda_k) - \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^N q_{\eta}(t_l, \lambda_k) \right)}{\frac{1}{MN} \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^N q_{\eta}(t_l, \lambda_k)}, \quad (15)$$

$$D_0 = \frac{1}{MN} \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^N \left[q_{\eta}(t_l, \lambda_k) - \frac{1}{MN} \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^N q_{\eta}(t_l, \lambda_k) \right]^2, \quad (16)$$

$$D_1 = \frac{1}{MN} \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^N \left[q_{\xi}(t_l, \lambda_k) - \frac{1}{MN} \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^N q_{\xi}(t_l, \lambda_k) \right]^2, \quad (17)$$

де $q_{\eta}(t_l, \lambda_k)$, $q_{\xi}(t_l, \lambda_k)$ — тестова статистика стаціонарного та нестаціонарного РКС. Відношення енергії нестаціонарного до спектральної густини потужності стаціонарного РКС $\sqrt{2E/N_0}$ відповідає математичному сподіванню m_1 РКС із розладкою. Підставляючи вирази (14-17) в (9-10) отримано характеристики достовірності визначення розладки РКС, отримані із використанням синфазного методу оцінювання спектральних компонент при відомих параметрах тестових РКС, що відповідають характеристикам, наведеним на рис.8.

Для підвищення достовірності визначення розладки РКС обґрунтовано використання критерію адаптації параметрів спектрального аналізу для пошуку періоду корельованості РКС та визначення типу віконної функції за максимумом варіації спектральних компонент. Для пошуку періоду корельованості T_K застосовано міру варіації (рельєфності) спектральних компонент РКС $q_\xi(t_0/T_p), t_0 \in [0; T_p)$ при зміні пробного періоду корельованості T_p

$$V(q_\xi; [a; b]) = \sup_{\forall D_n([a; b])} \frac{1}{MN} \sum_{l=1}^M \sum_{k=1}^N (q_\xi(t_l, \lambda_{k+1}) - q_\xi(t_l, \lambda_k))^2 \quad (18)$$

Оптимальному значенню періоду корельованості відповідає значення, яке забезпечує максимум варіації спектральних компонент тестової статистики РКС:

$$\hat{T}_K = \arg \max_{\{T_p\}} V(q_\xi; [0; T_p]) \quad (19)$$

Втрати достовірності визначення розладки РКС, що виникають при отриманні тестової статистики й пов'язані з накладанням та зсувом сусідніх спектральних компонент зменшують застосуванням функцій вікна. Для задачі визначення розладки РКС з гарантованою достовірністю обґрунтовано отримання оптимальної віконної функції за максимумом варіації спектральних компонент тестової статистики РКС, обчислених при різних типах віконної функції w_p

$$w = \arg \max_{\{w_p\}} V(q_\xi; w_p) \quad (20)$$

На базі розробленого методу визначення розладки ритмокардіосигналу, розроблено алгоритм визначення розладки РКС. Його розділено на дві частини.

1. Алгоритм обчислення порога визначення розладки, в якому виконано такі операції: а) приведення РКС до нульового математичного сподівання та одиничної дисперсії; б) сегментація стаціонарного РКС на відрізки ковзним вікном (рис. 9); в) для отриманих відрізків визначається період корельованості (19); г) обчислення спектральних компонент тестової статистики РКС синфазним методом (12); д) обчислення математичного сподівання m_0 та дисперсії D_0 тестової статистики (14, 16) за спектральними компонентами; е) обчислення порога визначення розладки (10).

2. Алгоритм визначення розладки РКС та оцінювання його достовірності, в якому виконуються такі операції: а) приведення РКС до нульового математичного сподівання та одиничної дисперсії; б) сегментація стаціонарного РКС на відрізки ковзним вікном (рис. 9); в) для отриманих відрізків визначається період корельованості (19); г) обчислення спектральних компонент тестової статистики РКС (12) синфазним методом; д) порівняння спектральних компонент тестової статистики з обчисленим порогом, при перевищенні порогу приймається рішення про появу розладки РКС; е) сегментація РКС на стаціонарні і нестаціонарні відрізки; є) оцінювання достовірності визначення розладки РКС (9).

У **четвертому розділі** наведено результати моделювання і тестування методів та алгоритмів визначення розладки РКС. Розроблено та протестовано алгоритм отримання тестових РКС та алгоритм виділення RR інтервалів ЕКС.

Протестовано алгоритм пошуку періоду корельованості та визначення віконної функції для підвищення достовірності визначення розладки РКС. Побудовано характеристики достовірності визначення розладки РКС та на їх основі проведено порівняльний аналіз методів спектрального аналізу (синфазного методу, методу періодограм, Уелча та Берга).

Тестування алгоритму визначення розладки РКС проведено на тестових сигналах з відомими параметрами і на сигналах, відібраних за допомогою системи ГМ CardioSens.

Протестовано алгоритм та визначено період корельованості за максимумом варіації спектральних компонент (рис.10). З цих графіків бачимо, що функція варіації $V(\bullet)$ досягає максимуму при періоді корельованості РКС. Також спостерігаються максимуми при періодах кратних періоду корельованості РКС.

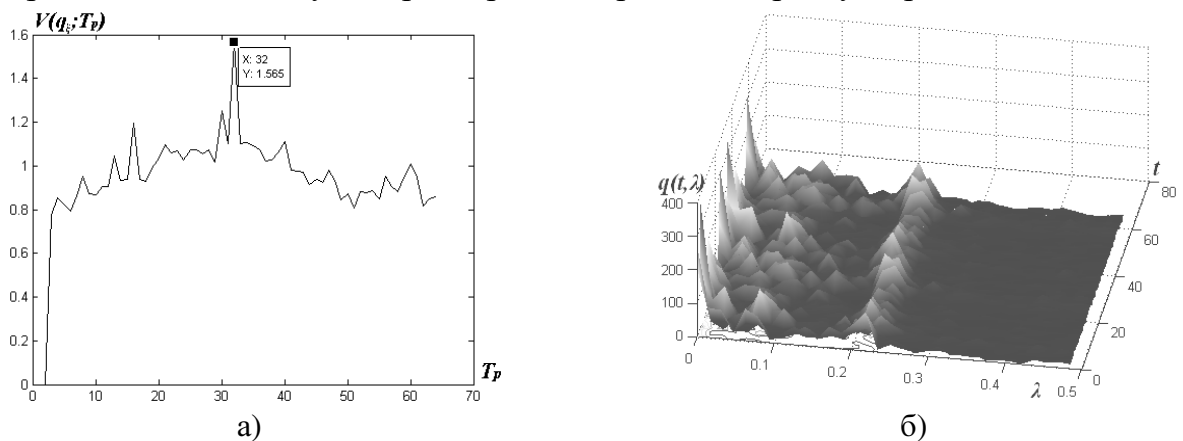


Рис.10. Визначення періоду корельованості РКС: а) варіація спектральних компонент РКС; б) спектральні компоненти тестової статистики РКС обчислені за максимумом варіації

Протестовано алгоритм та визначено тип віконної функції за максимумом варіації спектральних компонент РКС. Отримані результати (табл. 1) свідчать, що різниця варіації спектральних компонент для вікон Гемінга і Кайзера є незначною. Однак вікно Кайзера є близьким до оптимального, оскільки зосереджує найбільшу енергію в центральній пелюстці при заданій амплітуді бокової пелюстки спектру, що важливо при обчисленні відношення E/N_0 .

Таблиця 1

Визначення оптимальної віконної функції

Тип віконної функції	Бартлета	Ганна	Гемінга	Гауса	Кайзера
Варіація у відносних одиницях	0.8265	0.8894	0.9786	0.6792	1.0000

Отримані результати визначення періоду корельованості РКС та оптимального вікна застосовано при тестуванні алгоритмів визначення розладки РКС. За розробленим алгоритмом обчислено поріг h визначення розладки РКС. Рішення про розладку приймається при перевищенні тестовою статистикою порога, що зображено на рис.11, і відображається зміною індикаторною функції $\theta(t)$, що вказує на появу розладки РКС і зображено на рис.12.

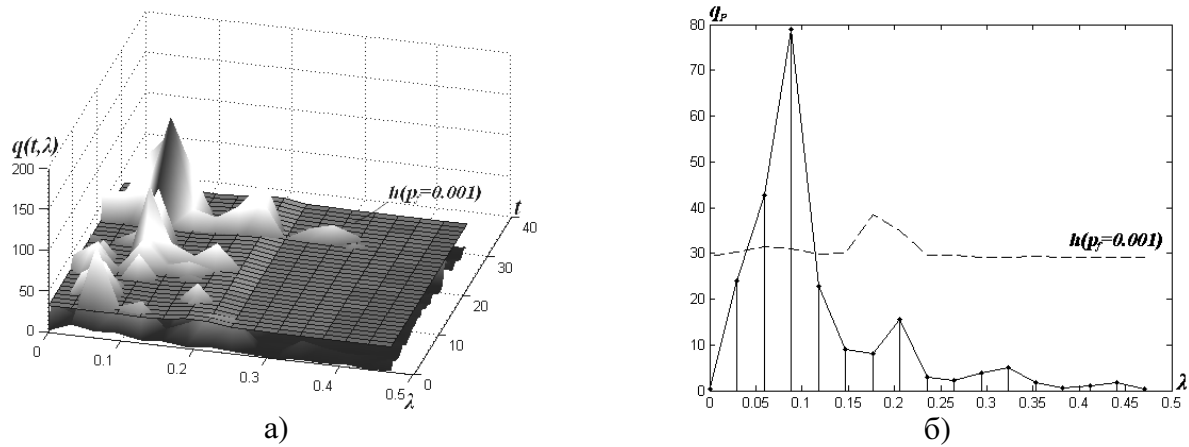


Рис. 11. Тестова статистика визначення розладки РКС для нестационарного РКС отримана: а) синфазним методом (абсциса — частота Гц., ордината — час с.; апліката — спектральна густина потужності $\text{с}^2/\text{Гц}$); б) методом періодограм (абсциса — частота Гц., ордината — спектральна густина потужності $\text{с}^2/\text{Гц}$)

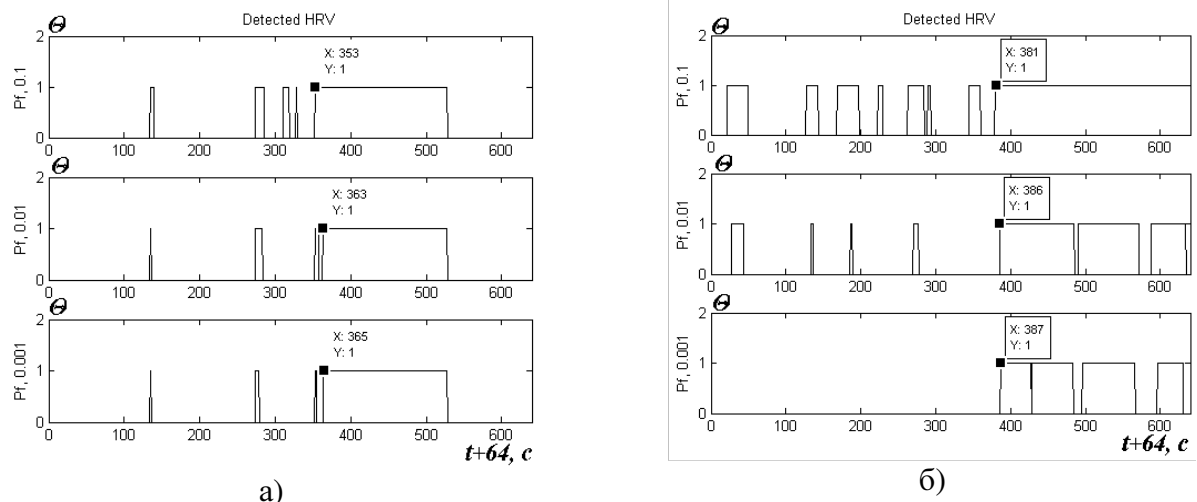


Рис. 12. Визначена розладка РКС із застосуванням: а) синфазного методу; б) методу періодограм

За результатами тестування методів та алгоритмів визначення розладки РКС отримано характеристики достовірності визначення розладки РКС (рис.13, 14).

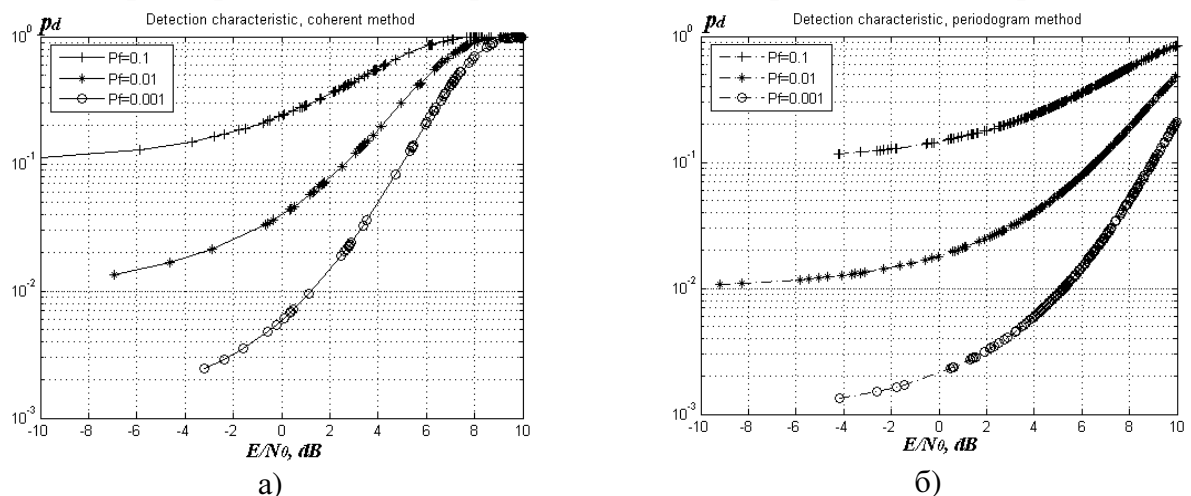


Рис. 13. Характеристики достовірності визначення розладки РКС, обчислені за спектральними компонентами, отриманими: а) синфазним методом; б) методом періодограм

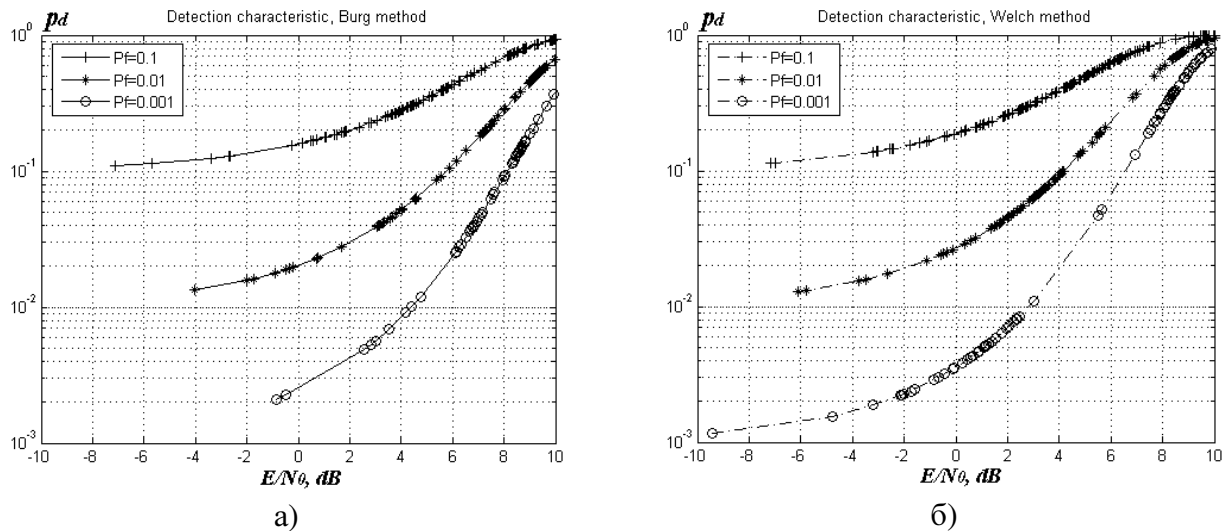


Рис. 14. Характеристики достовірності визначення розладки РКС, обчислені за спектральними компонентами, отриманими: а) методом Берга; б) методом Уелча

Тестування алгоритму визначення розладки РКС показує, що характеристики достовірності визначення розладки (рис.13, 14) відрізняються від ідеальних, наведених на рис.8. Це викликано невідомістю параметрів і втратами енергії при розмиванні та просочуванні.

Порівнюючи результати на рис. 13, 14, зауважуємо, що достовірність визначення розладки РКС p_d при застосуванні синфазного методу спектрального аналізу, параметри якого адаптовані до структури ритмокардіосигналу, є вищою в порівнянні з методами періодограм у 2 рази, Берга — в 1,8 рази та Уелча — в 1,4 рази, при імовірності помилкового визначення розладки 0,1 та відношенні $E/N_0 = 4$ дБ енергії нестационарного до спектральної густини потужності стаціонарного РКС. Загалом встановлено, що характеристики визначення розладки РКС синфазним методом кращі за такі ж характеристики, визначені за іншими методами.

У **додатках** наведено тексти програм, розроблені в середовищі Matlab для ПК (ОС Windows XP), акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано наукове завдання побудови математичної моделі ритмокардіосигналу із розладкою та розроблення методів достовірного визначення його розладки та підвищення вірогідності автоматичного оцінювання параметрів варіабельності ритмокардіосигналу в системах голтерівського моніторингу. Метод базується на побудованому критерії визначення розладки РКС, що уможливорює автоматичне визначення моменту зміни кореляційних зв'язків РКС. Отриманий метод визначення розладки РКС придатний для реалізації сучасними програмними засобами та автоматично визначає момент зміни кореляційних зв'язків РКС для його подальшого аналізу. Це спрощує апаратуру й підвищує вірогідність систем голтерівського моніторингу. Отримано нові та науково значущі результати:

1. Шляхом аналізу відомих математичних моделей та методів оцінювання параметрів варіабельності ритмокардіосигналу встановлено що, не існує критерію автоматичного визначення розладки ритмокардіосигналу та оцінювання його достовірності.

2. Побудовано математичну модель ритмокардіосигналу із розладкою, шляхом врахування розладки стаціонарної і переходу до періодично корельованої випадкової послідовності, що уможливило побудову критерію визначення розладки ритмокардіосигналу.

3. Розроблено критерій визначення розладки ритмокардіосигналу. Рішення приймають на основі статистичного критерію Неймана–Пірсона за результатами випробування, що полягає в обчисленні тестової статистики для ковзного вікна фіксованої тривалості й порівнянні її з порогом, що уможливорює автоматичне визначення розладки ритмокардіосигналу з гарантованою достовірністю за відсутності апріорної інформації про розладку ритмокардіосигналу.

4. Обґрунтовано спектральне представлення ритмокардіосигналу шляхом розкладу його за власними функціями кореляційного оператора, та застосовано для обчислення тестової статистики визначення розладки ритмокардіосигналу, що не залежить від моменту його відбору.

5. Обґрунтовано використання критерію адаптації параметрів спектрального аналізу та вибору віконної функції за максимумом варіації спектральних компонент ритмокардіосигналу для оптимального його налаштування при невідомих параметрах ритмокардіосигналу, що підвищило достовірність визначення розладки ритмокардіосигналу.

6. Верифіковано математичну модель ритмокардіосигналу із розладкою та отримано характеристики достовірності методів визначення розладки ритмокардіосигналу шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі Matlab, використовуючи розроблені на основі методу алгоритми та програмне забезпечення.

7. Підвищено достовірність методу визначення розладки ритмокардіосигналу шляхом використання синфазного методу спектрального аналізу, параметри якого адаптовані до структури ритмокардіосигналу, в порівнянні з методами періодограм в 2–2,5 раза, Берга — в 1,7–1,8 раза та Уелча — в 1,4–1,5 раза, при імовірності помилкового визначення розладки ритмокардіосигналу 0,1 та відношенні 4дБ енергії нестационарного до спектральної густини потужності стаціонарного РКС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лещишин Ю. Обчислення тестової статистики та характеристик виявлення варіабельності серцевого ритму при холтерівському моніторинзі / Ю. Лещишин, Б. Яворський // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль. – 2006. – Том 9, №2. – С. 92–97. *(Входить до переліку видань міжнародної наукометричної бази Inspec).*
2. Лещишин Ю.З. Виявлення періодично корельованої варіабельності серцевого ритму за критерієм Неймана–Пірсона / Ю.З. Лещишин // Комп'ютерні

- технології друкарства: Зб. наук. пр. № 18. – Львів: Українська академія друкарства, 2007. – С. 204–211.
3. Бачинський М.В. Фільтровий метод визначення параметрів варіабельності серцевої ритміки / М.В. Бачинський, Ю.З. Лецишин, В.В. Фалендиш // Вісник Хмельницького національного університету.– Хмельницький.– 2006.– №4 (83). – С.180–185.
 4. Семчишин О.В. Алгоритм виділення RR-інтервалів кардіосигналу для задачі аналізу варіабельності серцевого ритму в системі реального часу / О.В. Семчишин, Ю.З. Лецишин, В.П. Забитівський // Вісник Хмельницького національного університету.– Хмельницький.– 2007.– Т.1, №6. – С.130–136.
 5. Яворський Б.І. Метод визначення точки розладки ритмокардіосигналу / Б.І. Яворський, Ю.З. Лецишин // Комп'ютерні науки та інформаційні технології / Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”.– 2011. – №694. – С.107–113. (*Входить до переліку видань міжнародної наукометричної бази Inspec*).
 6. Семчишин О.В. Оцінка ефективності методу виділення RR-інтервалів електрокардіосигналів плоду / О.В. Семчишин, Ю.З. Лецишин // Вісник Хмельницького національного університету.– Хмельницький.– 2010.– Т.1, №5. – С.187–193.
 7. А. С. 46134 України. Комп'ютерна програма «Change point detector 1.1» / Ю. З. Лецишин, Б.І. Яворський, ТНТУ ім. І.Пулюя. – заявка №44989 від 15.05.12; реєстрація 25.10.12.
 8. Бачинський М. Побудова моделей інформаційного забезпечення при холтерівському моніторингу / М. Бачинський, Ю. Лецишин // Матеріали 7-го міжнародного молодіжного форуму "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке": Зб. матеріалів.– Харьков.– 2003.– С.347.
 9. Дозорський В.Г. Побудова метрологічного базису поліграфа при дослідженні варіабельності серцевого ритму / В.Г. Дозорський, Ю.З. Лецишин // 11-а наукова конференція ТДТУ: Зб. матеріалів.– Тернопіль: ТДТУ, 2007. – С.113.
 10. Leschishyn Yu. Z. The imitation model, for the problem of nonstationarity heart rate variability recognition for Holter monitoring systems / Yu. Z. Leschishyn, T. M. Rafa, M. V. Bachyns'kyi // Праці 1-ї Міжнародної конференції “Електроніка та прикладна фізика”. – Київ: КНУ ім. Т. Шевченка. – 2005. – С.123–124.
 11. Leschishyn Yu. Probability integral parameters identification at heart rate variability type detection by Neyman - Pearson criterion / Yury Leschyshyn, Bohdan Yavorskyu, Taras Rafa, Galina Shadrina // Матеріали Міжнародної конференції TCSET'2006 – Львів-Славсько: Національний університет “Львівська політехніка”. – 2006. – С.628–629.
 12. Leschishyn Yu. Periodically correlated heart rate variability detection by Neyman - Pearson criterion / Yury Leschyshyn, Olexander Semchyshyn // Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці: Матеріали 9-ї Міжнародної конференції CADSM'2007. – Львів-Поляна: Національний університет “Львівська політехніка”. – 2007. – С.139–140.

- 13.Лецишин Ю.З. Застосування когерентного методу при виявленні періодично корельованої варіабельності серцевого ритму за критерієм Неймана–Пірсона / Ю.З. Лецишин // 11-й міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.»: Зб. матеріалів форуму.– Харків: ХНУРЕ, 2007. Ч.І. – С.273.
- 14.Лецишин Ю.З. Вибір віконної функції при цифровому спектральному аналізі для обчислення статистики визначення розладки ритмокардіосигналу / Ю.З. Лецишин // Матеріали всеукраїнської наукової конференції ТДТУ імені Івана Пулюя. – Тернопіль, 2009.–С.161.
- 15.Leschyshyn Yu. Detection characteristics computation of nonstationarity heart rate variability by Neyman - Pearson criterion / Yury Leschyshyn, Olexander Semchyshyn, Vasyl Dozorskyu // Матеріали Міжнародної конференції TCSET'2008. – Львів-Славсько: Національний університет “Львівська політехніка”. – 2008. – С.131–132.
- 16.Leschishyn Yu. The change-point detection in rhythmocardiosignal by Neyman-Pearson criterion / Yury Leschyshyn, Olexander Semchyshyn, Vasyl Dozorskyu // Матеріали Міжнародної конференції TCSET'2010. – Львів-Славсько: Національний університет “Львівська політехніка”. – 2010. – С.127.
- 17.Лецишин Ю.З. Математична модель розладки ритмокардіосигналу / Ю.З. Лецишин // Матеріали 15-ї наукової конференції ТНТУ імені Івана Пулюя. – Тернопіль, 2011.–С.166.

АНОТАЦІЯ

Лецишин Ю.З. Математична модель та методи ефективного визначення розладки ритмокардіосигналу. — 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, 2013.

У дисертаційній роботі розв'язано наукове завдання розроблення математичної моделі ритмокардіосигналу та методів достовірного визначення його розладки для підвищення вірогідності автоматичного оцінювання параметрів варіабельності ритмокардіосигналу в системах голтерівського моніторингу.

Побудовано математичну модель ритмокардіосигналу, що враховує розладку. Розроблено критерій визначення розладки ритмокардіосигналу. Обґрунтовано та застосовано спектральне представлення ритмокардіосигналу для обчислення тестової статистики визначення його розладки. Обґрунтовано та розроблено критерій адаптації параметрів спектрального представлення ритмокардіосигналу для підвищення достовірності визначення розладки. Побудовано критерій ефективності методів визначення розладки ритмокардіосигналу для вибору достовірнішого з них. Розроблено алгоритм і програмне забезпечення для визначення розладки ритмокардіосигналу. Проведено комп'ютерне моделювання методів визначення розладки ритмокардіосигналу для верифікації математичної моделі та оцінювання характеристик достовірності визначення розладки РКС. Розроблено програмне забезпечення для імітаційного

моделювання ритмокардіо- та електрокардіосигналів із розладкою. Розроблено алгоритм визначення періоду корельованості для оптимального налаштування синфазного методу отримання тестової статистики та вибору віконної функції.

Ключові слова: визначення розладки, ритмокардіосигнал, критерій Неймана–Пірсона, періодично корельована випадкова послідовність, синфазний метод.

АННОТАЦИЯ

Лещин Ю.З. Математическая модель и методы эффективного обнаружения разладки ритмокардиосигнала. — Рукопись.

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

В диссертационной работе решено научное задание построение математической модели ритмокардиосигнала и разработки методов достоверного обнаружения его разладки для повышения достоверности автоматического оценивания параметров variability ритмокардиосигнала в системах холтеровского мониторинга.

Построена математическая модель ритмокардиосигнала с разладкой, которая отличается от известных тем, что учитывает изменение ритмокардиосигнала от стационарной к периодически коррелированной случайной последовательности, что сделало возможным разработку критерия обнаружения разладки ритмокардиосигнала.

Разработан критерий обнаружения разладки ритмокардиосигнала, путем модификации статистического критерия проверки гипотез Неймана–Пирсона к задаче обнаружения разладки ритмокардиосигнала, что сделало возможным обнаружения разладки с последующим определением временного момента ее наступления. Обосновано и внедрено спектральное представление ритмокардиосигнала для вычисления тестовой статистики обнаружения разладки ритмокардиосигнала за построенным критерием, это сделало возможным построение метода обнаружения разладки, что в отличие от других является инвариантным к моменту отбора сигнала.

Разработан метод обнаружения разладки ритмокардиосигнала путем применения критерия обнаружения разладки к тестовой статистики, полученного за спектральным представлением ритмокардиосигнала, что сделало возможным достоверное обнаружение его разладки. Обосновано использование критерия адаптации параметров цифрового спектрального анализа и выбора оконной функции по максимуму вариации спектральных компонент ритмокардиосигнала для его оптимальной настройки при неизвестных параметрах ритмокардиосигнала, что повысило достоверность обнаружения разладки ритмокардиосигнала. Определено достоверность синфазного, Уэлча, Берга и периодограмного методов вычисления статистики обнаружения разладки ритмокардиосигнала по характеристикам достоверности определения разладки

ритмокардиосигнала, что упрощает аппаратуру оценивания параметров variability РКС за счет применения более достоверного из них.

Разработан алгоритм и программное обеспечение для обнаружения разладки ритмокардиосигнала. Проведено компьютерное моделирование методов обнаружения разладки ритмокардиосигнала для верификации математической модели и оценки характеристик достоверности обнаружения разладки ритмокардиосигнала. Разработано программное обеспечение для имитационного моделирования тестовых ритмокардио- и электрокардиосигналов с разладкой. Разработан алгоритм определения периода коррелированности для оптимальной настройки параметров синфазного метода получения тестовой статистики и выбора оконной функции.

Ключевые слова: обнаружение разладки, ритмокардиосигнал, периодически коррелированная случайная последовательность, критерий Неймана–Пирсона, синфазный метод.

SUMMARY

Leschyshyn Yu.Z. Mathematical model and methods of effective rhythmocardiosignal change-point detection. — 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, Ternopil, 2013.

The thesis is resolved important scientific task of construction rhythmocardiosignal mathematical model and methods of its reliable change-point detection for reliability increases of automatic parameters estimation of rhythmocardiosignal variability in the Holter monitoring systems.

The rhythmocardiosignal mathematical model that takes into considered change-point is developed. The criterion of rhythmocardiosignal change-point detection is developed. The rhythmocardiosignal spectral representation for calculation of test statistics of rhythmocardiosignal change-point detection with use of the criterion constructed is proved and applied. The criterion of parameters adaptation of rhythmocardiosignal spectral representation is proved and developed for increase of its reliability change-point detection. The criterion of methods efficiency of rhythmocardiosignal change-point detection is developed for a choice of more reliable of them. The algorithm and software is developed for rhythmocardiosignal change-point detection. Computer modeling of rhythmocardiosignal change-point detection methods for verification of mathematical model and estimation of reliability characteristics of rhythmocardiosignal change-point detection is spent. The software is developed for imitating modeling test rhythmocardiosignal and electrocardiosignal with change-point. The algorithm of the correlation period definition is developed for optimum adjustment of parameters synphase method of test statistics reception and choice window function.

Key words: change-point detection, rhythmocardiosignal, the Neyman-Pearson criterion, periodically correlated stochastic sequence, synphase method.