

УДК 616.71:616.12-008.318

Є. Яворська

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

АДЕКВАТНІСТЬ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РИТМОКАРДІОГРАМИ

У роботі запропоновано метод, який уможливує оцінювання вірогідності результатів спектрального аналізу ритмокардіограми (РКГ) та прогнозування вірогідності результатів аналізу характеристик варіабельності серцевої ритміки (ВСР) нестационарної РКГ. Наведено результати порівняльного аналізу отриманих при комбінуванні тестових стаціонарних і періодично-корельованих РКГ і методів спектрального аналізу стаціонарних та періодично-корельованих послідовностей. Визначено вірогідності результатів оцінювання спектральної густини потужності РКГ.

E. Yavorska

ADEQUACY OF MATHEMATICS MODEL OF RYTHMOCARDIOGRAM

In the paper is proposed the method which make possible to obtain a confidence estimate of the spectra of rhythm cardiogram (RCG) what lead to ability of the confidence prediction of results of analysis of heart rate variability (HRV) characteristics of a nonstationary RCG. The comparative analysis of results has been rich at combining of test RCG's and methods of spectral analysis is presented. Confidences of results of estimations of a power spectral density of RCG are determined.

Серцева ритміка (ритм серця) знаходить все більше застосування при функціональній прогностичній діагностиці психоемоційного та біофізіологічного стану організму людини. Увага звертається на характеристики, які визначають варіабельність (мінливість) ритму. Варіабельність ритму є ознакою адаптації організму до зовнішніх (та внутрішніх) подразнень, що важливо, наприклад, для ранньої, прогностичної діагностики серцевих аритмій, прогресуючої стенокардії, гострого коронарного синдрому, психоемоційного стану тощо.

Для оцінювання варіабельної ритмокардіограми (РКГ) застосовують методи спектрального аналізу, які відрізняються способом параметризації стаціонарної моделі, оскільки реакції серцево-судинної системи на подразнення з боку вегетативної нервової системи не завжди є стаціонарними, і для врахування нестационарності застосовують евристично, експериментально вибрані інтервали часу оцінювання, фази реєстрації електрокардіосигналу тощо [1]. Це значно ускладнює апаратуру при забезпеченні необхідної вірогідності результатів спектрального аналізу та автоматизації оцінювання спектральних характеристик РКГ.

Для врахування нестационарності РКГ при автоматичному оцінюванні її спектру з прогнозованою вірогідністю застосовано періодично-корельовану випадкову послідовність (ПКВП) для математичного моделювання РКГ, що уможливило автоматизацію аналізу нестационарної РКГ з прогнозованою вірогідністю її результатів, а також запровадження нових діагностичних ознак психоемоційного та біофізіологічного стану організму людини [2].

Побудовано комп'ютерну імітаційну модель РКГ, яка враховує нестационарні випадки, з подальшим використанням її для автоматичного оцінювання характеристик [3]. При цьому застосовано тестові послідовності (тестові РКГ) (див. рис.1).

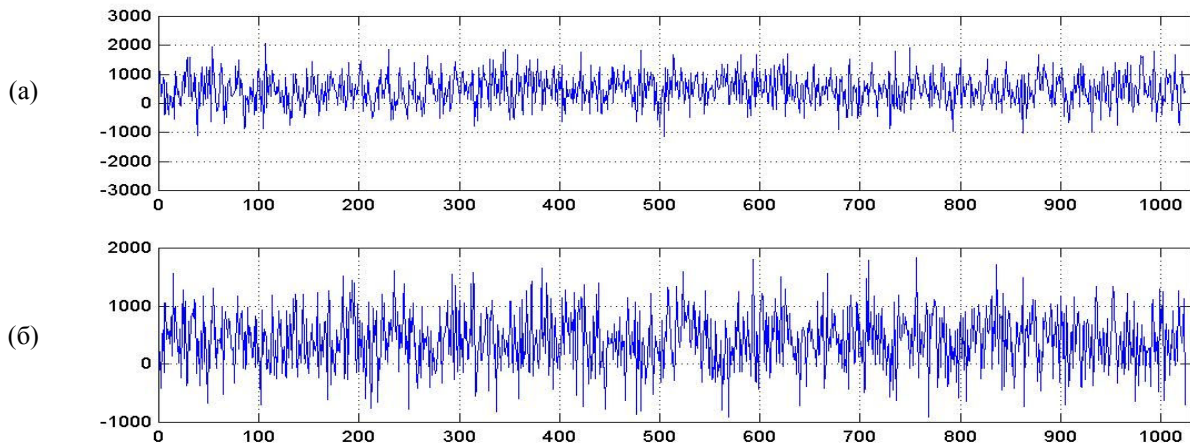


Рисунок 1 — Приклади тестових РКГ (вісь абсцис — кількість відліків РКГ, вісь ординат — значення RR-інтервалів): (а) — РКГ із випадковими стаціонарними значеннями RR-інтервалів; (б) — РКГ із періодично-нестационарними значеннями RR-інтервалів

Для верифікації засобів визначення характеристик нестаціонарної серцевої ритміки розроблено алгоритми тестування цифрових методів обробки нестаціонарної РКГ та запропоновано використання вибраної моделі сигналу у вигляді ПКВП у біотехнічній системі для дослідження характеристик ВСП КАРДІОСЕНС (НТЦ радіоелектронних медичних пристроїв і технологій ХАІ-МЕДІКА, м. Харків).

Використано методи статистичної теорії вибору рішень, а саме критерій Неймана-Пірсона та обчислювальні методи засобів математичного та програмного забезпечення пакету MATLAB для вирішення задачі тестування методу оцінювання спектральних компонент нестаціонарної РКГ. Результати, отримані при оцінюванні спектральних компонент, показали, що спектри нестаціонарної послідовності зосереджені на різних стаціонарних компонентах, які визначаються часовою структурою його спектру та аналізу, а спектри стаціонарної РКГ є частковим їх випадком (див. рис.2).

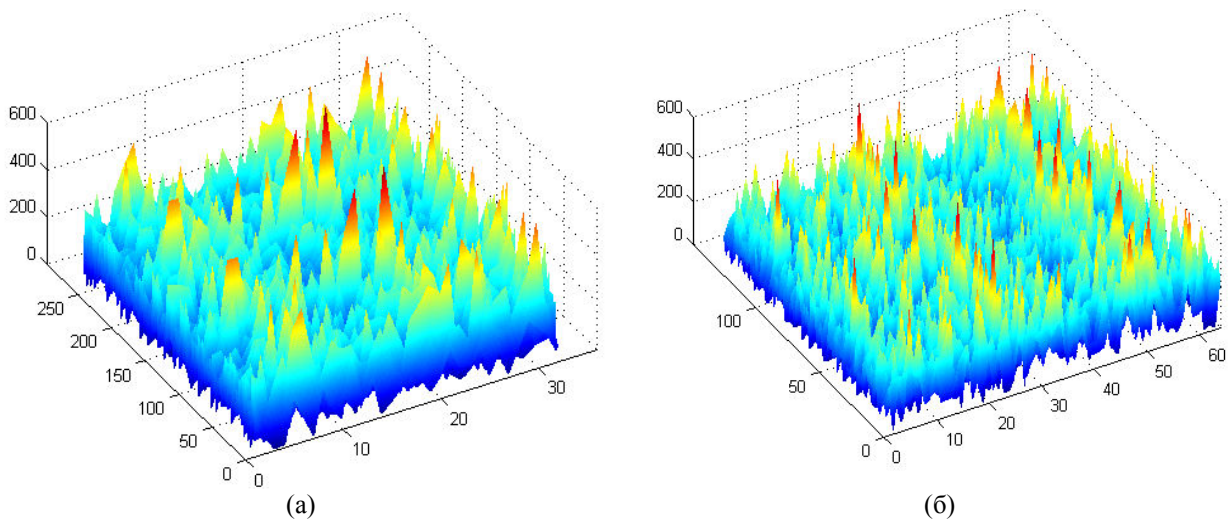


Рисунок 2 — Спектральні компоненти згенерованої ритмокардіограми (вісь абсцис — k , номер компоненти; вісь ординат — $l \times 3 \cdot 10^{-3}$, індекси гармонік спектру; $Гц$; вісь аплікату — спектральна густина потужності, $мс^2/Гц$)

Використання спектральних компонент для нестаціонарно-варіабельних послідовностей уможливило отримання вірогідніших їх оцінок, бо при цьому спектри нестаціонарної послідовності зосереджені на різних стаціонарних компонентах, які визначаються часовою структурою його спектру та аналізу, а спектри стаціонарної РКГ є частковим їх випадком. Таким чином, підтверджено, що цифрові методи

опрацювання РКГ для визначення характеристик серцевої ритміки безпосередньо за результатом аналізу РКГ інформативніші від методів обробки в рамках стаціонарної моделі.

Встановлено, що у випадку РКГ із малою кількістю компонент доцільніше використовувати компонентний метод аналізу, оскільки синфазний метод дає змішування характеристик, що для даного типу сигналу не є інформативним.

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

Наведено методи модифікації стандартних таких показників задля обчислення їх за компонентами спектральної густини потужності періодично-корельованої випадкової послідовності — удосконаленої математичної моделі РКГ чи спектральної густини потужності — стаціонарної моделі.

Для визначення вірогідності p_D оцінки спектральної густини потужності тестового сигналу спочатку знайдено поріг v (тестову статистику для вибору рішення про адекватність моделі). При цьому імовірність p_F вибрано з ряду значень (0.001; 0.01; 0.1). Поріг

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

де $m_0 = \sum m_{PSD} / N$, $\sigma_0 = \sum \sigma_{PSD}^2 / N$ — відповідно, матсподівання і середньоквадратичне відхилення усередненого значення спектральної густини потужності стаціонарної тестової РКГ („навчальний” експеримент). Тут Φ^{-1} позначено інтеграл імовірності, функцію, обернену до $\Phi(x)$, яку реалізує функція MATLAB `norminv` (inverse of the normal cumulative distribution function).

На рис. 3 наведено графіки ансамблю спектральної густини потужності (power spectral density — PSD) стаціонарної тестової послідовності та порогів (статистик) для вибору рішення про коректність оцінки PSD за критерієм Неймана-Пірсона.

Пороги визначались для заданих імовірностей некоректності оцінки за ансамблем оцінок спектральної густини потужності реалізацій РКГ. При цьому встановлено адекватність застосування нормальної функції розподілу імовірностей значень РКГ.

Імовірність p_D вірогідної оцінки спектральної густини потужності нестаціонарної тестової РКГ:

$$p_D = \Phi[v - (m_1 + \sigma_1)], \quad (2)$$

де m_1 , σ_1 — відповідно, усереднені значення матсподівання і дисперсії спектральної оцінки РКГ (наприклад, ПКВП).

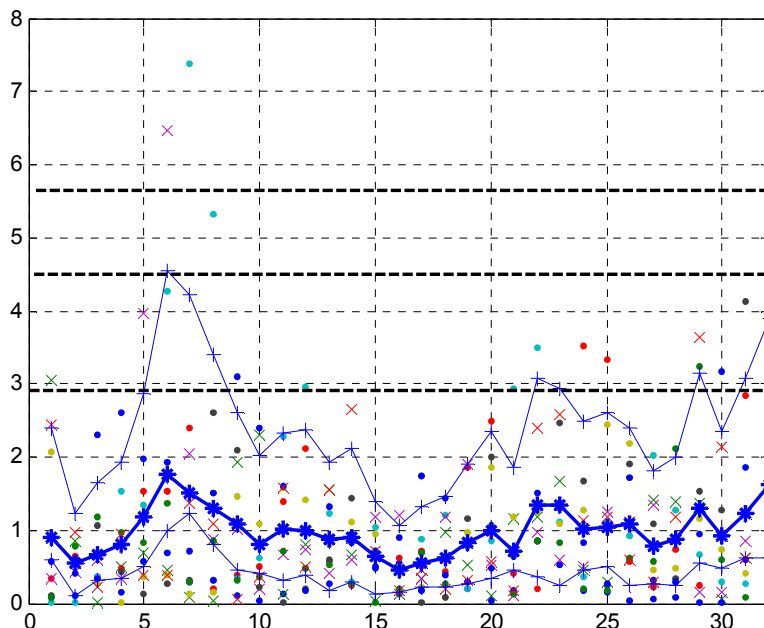


Рисунок 3 — Спектральна густина потужності тестової моделі РКГ та оцінки матсподівання і дисперсії (вісь абсцис — номер компоненти; вісь ординат — значення PSD, $m^2/Гц$; значення матсподівання (*) і дисперсії (+)). На рисунку вибрані реалізації спектральної густини потужності позначені як 'x', вказані пороги позначено '---', і вони відповідають значенням p_F (0.001; 0.01; 0.1) (див. знизу догори)

Для нестационарної РКГ ці оцінки обчислено з врахуванням компонентної структури:

$$m_1 = \frac{1}{kl} \sum_k \sum_l m_{kl} ; \quad (3)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{(k-1)l} \sum_k \sum_l \sigma_{kl} , \quad (4)$$

де k, l — індекси, що визначають номер компоненти та гармонік.

На рис. 4 наведено типові графіки прогнозованої вірогідності оцінок спектральної густини потужності ВСП. Зміни аргументу у виразі (2) від 1.7 до 2.2 вибиралися з умов тестування пацієнта в амбулаторних умовах при різних функціональних пробах.

Якщо опрацювання проводилось запропонованими цифровими методами обробки РКГ, побудованими в рамках нестационарної моделі, то досягається автоматизм цієї обробки за рахунок врахування в моделі параметрів нестационарності. При цьому: якщо вибрана модель ПКВП, то криві вірогідності оцінки спектральної густини потужності для тестового стаціонарного сигналу виходять в 1,3 рази дещо гірші (як на рис. 4, а) в порівнянні з результатами, отриманими при обробці нестационарної послідовності як стаціонарної (тому що стаціонарний сигнал є частковим випадком ПКВП).

Результати цього дослідження послужили основою для впровадження розроблених методів у біотехнічній системі для дослідження характеристик серцевої ритміки КАРДІОСЕНС (НТЦ „ХАИ-МЕДИКА”, м. Харків).

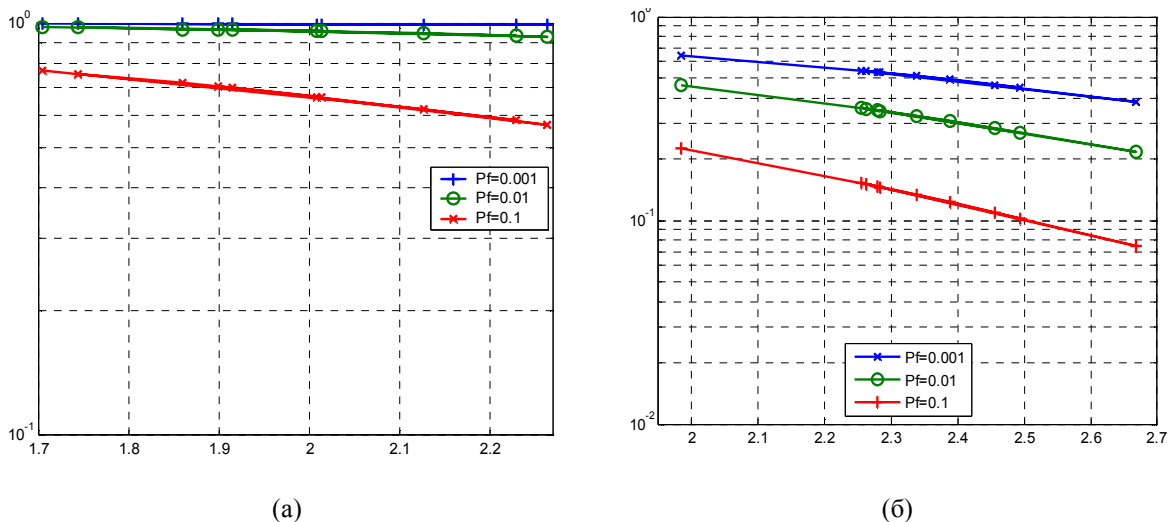


Рисунок 4 — Типові графіки прогнозованої вірогідності оцінок спектральної густини потужності (PSD) тестового сигналу при заданих імовірностях помилкової оцінки (вісь абсцис — $m_{PSD} + \sigma_{PSD}$; вісь ординат — імовірність оцінки спектру p_D при імовірності помилкової оцінки, при значеннях p_F : $_{+} 0.1$, $_{-} 0.01$, $_{\times} 0.001$): (а) — стаціонарна модель; (б) — нестаціонарна модель

Результати для РКС з бази даних КАРДІОСЕНС збігаються до отриманих тестових результатів.

Порівняльний аналіз результатів дослідження показує, що:

а) для методів оцінювання спектральної густини потужності ВСП нестаціонарної тестової РКГ в рамках нестаціонарної та стаціонарної моделі для суми матсподівання та середньоквадратичного відхилення спектральної густини потужності $2 \text{ мс}^2/\text{Гц}$ типова імовірність вірогідності цієї оцінки складає відповідно $P_d = 0.99$ та $P_d = 0.89$ при імовірності невірогідної оцінки $p_F = 0.001$, а для РКС з бази даних КАРДІОСЕНС типові імовірності вірогідності оцінки склали відповідно, $P_d = 0.85$ та $P_d = 0.77$;

б) для результатів оцінювання нестаціонарної та стаціонарної випадкової тестової послідовності методом, побудованим в рамках нестаціонарної моделі ритмокардіограми, імовірність вірогідної оцінки стаціонарної послідовності $P_d = 0.95$. Це вказує на те, що стаціонарна випадкова послідовність є частковим випадком періодично-корельованої випадкової послідовності.

При використанні розроблених методів обробки отримано вигравш вірогідності в 1,3 рази в діапазоні спектральної густини потужності варіабельності серцевої ритміки ($2 \div 2,2$) $\text{мс}^2/\text{Гц}$ для медичної норми в тесті з присіданнями (20 присідань за хвилину) в порівнянні з результатами, коли використовується комп'ютерна модель оцінювання спектральної густини потужності в рамках стаціонарної моделі.

Таким чином, результати, отримані для комп'ютерної моделі оцінювання спектральної густини потужності нестаціонарної РКГ в рамках нестаціонарної моделі в порівнянні з результатами, в яких врахована лише стаціонарна модель, є важливими при функціональній прогностичній діагностиці психоемоційного та біофізіологічного стану організму людини.

Висновки

Встановлено, що результати, отримані для комп'ютерної моделі оцінювання спектральної густини потужності нестаціонарної ритмокардіограми в рамках нестаціонарної моделі, в порівнянні з результатами, в яких врахована лише стаціонарна модель, є важливими при функціональній прогностичній діагностиці психоемоційного та біофізіологічного стану організму людини.

Література

1. Драган Я., Медиковський М., Сікора Л., Яворська Є.. Принципи виявлення феноменів тонкої структури R-зубців кардіоритму // Комп'ютерні технології друкарства: Зб. наук. пр. № 12. — Львів: Українська академія друкарства, 2004. — С. 162-167.
2. Драган Я.П., Яворський Б.І., Яворська Є.Б. Концепції і принципи побудови моделей для означення метрологічних характеристик ритміки кардіосигналів // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Зб. наук. пр. № 443, Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2002. — С. 200-205.
3. Bondarenko Z., Pyeh O., Yavors'ka E. Computer Model Rhythmic the Cardiogram for Research of Characteristics Heart Rate Variability. // Proceedings of the International Conference TCSET'2006, February28-March 4, 2006. — Lviv-Slavska, Ukraine. — P. 630-632.

Одержано 03.11.2008 р.