

## ІНФОРМАЦІЙНО-ДІАГНОСТИЧНІ СИСТЕМИ

УДК 620.179

E707.01+ B143

В.П. Бабак, чл.-кор. НАН України  
О.В. ЧілікинЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГОЛОВНИХ КОМПОНЕНТ  
ДЛЯ АНАЛІЗУ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ РИТМУ СЕРЦЯ

Інститут інформаційно-діагностичних систем НАУ, e-mail: iids@nau.edu.ua

*Розглянуто основні методи, застосовувані на теперішній час для аналізу варіабельності ритму серця. Проведено аналіз їх недоліків. Запропоновано використання методу головних компонент для аналізу варіабельності ритму серця. Показано його переваги в порівнянні з існуючими методами аналізу.*

## Вступ

Одним з інструментальних методів діагностики стану серцево-судинної системи людини є аналіз варіабельності ритму серця.

Варіабельністю ритму серця називають поциклові зміни інтервалів часу між послідовними серцевими скороченнями.

Це явище спостерігається практично у всіх здорових людей.

Традиційно варіабельність ритму серця досліджується на підставі часового ряду послідовності RR-інтервалів електрокардіограми (ЕКГ), що є записом електричних потенціалів активності серця, реєстрованих у певних точках на поверхні тіла.

Електрокардіограма складається з періодичної послідовності серцевих циклів (рис. 1), числовий ряд тривалостей яких відображає варіабельність ритму і є предметом математичного аналізу.

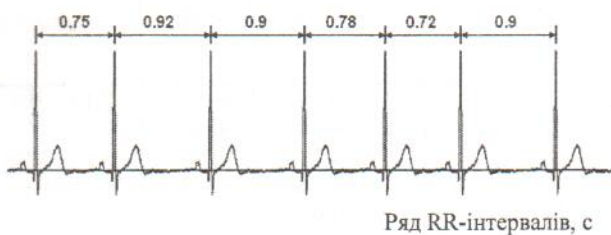


Рис. 1. Формування часового ряду тривалостей RR-інтервалів на підставі ЕКГ

Виходячи з умов реєстрації експериментальних даних, часові ряди RR-інтервалів можуть бути стаціонарними і нестационарними.

Стаціонарними є ряди RR-інтервалів з приблизно однаковим характером поведінки на різних ділянках, що мають вигляд безперервних коливань навколо деякого середнього значення.

Стаціонарні ряди одержують при реєстрації ЕКГ в умовах спокою.

Нестационарними (перехідними) є часові ряди RR-інтервалів з певною тенденцією розвитку в часі. Такі ряди RR-інтервалів мають тренд, тобто поступову зміну середнього рівня досліджуваного процесу в позитивному або негативному напрямі.

Нестационарні ряди одержують під час проведення різних функціональних проб.

Принципова різниця між двома вказаними типами рядів полягає в тому, що з фізіологічного погляду стаціонарні ряди RR-інтервалів відображають діяльність регуляторних механізмів для підтримки функціональної рівноваги, а нестационарні – зміну режиму функціонування системи кровообігу у відповідь на зовнішню дію.

На сьогодні найчастіше використовують статистичний підхід до аналізу стаціонарних рядів RR-інтервалів і спектральний аналіз [1].

Статистичний підхід до аналізу варіабельності ритму серця заснований на гіпотезі, що часовий ряд RR-інтервалів являє собою стаціонарний випадковий процес, який має ергодичні властивості.

До стандартного набору параметрів, визначуваних на підставі ряду RR-інтервалів у рамках статистичного підходу до аналізу варіабельності, належать такі показники:

RR (NN) – середня тривалість інтервалів RR та обернена величина цього показника – середня частота серцевих скорочень;

SDNN – стандартне відхилення величин нормальних інтервалів RR;

RMSSD – квадратний корінь із середнього квадрата різниць величин послідовних пар інтервалів;

pNN50% – відсоток послідовних інтервалів RR, відмінність між якими перевищує 50%.

Спектральний аналіз застосовується, у першу чергу, для виявлення періодичних складових коливань серцевого ритму і кількісної оцінки їх внеску в загальну потужність коливань.

Основною метою спектрального аналізу є спроба через спектральні характеристики підійти до розуміння особливостей роботи різних контурів регуляції серцевого ритму.

Для проведення спектрального аналізу необхідно нерівномірну вибірку RR-інтервалів за допомогою методів інтерполяції і подальшої дискретизації перетворити в еквівалентну числову послідовність з рівномірним кроком, до якої можна застосувати математичний метод спектрального аналізу (перетворення Фур'є) [2].

Наочним зображенням такого перетворення є графік спектра потужності – залежність потужності коливань від їх частоти (рис. 2).

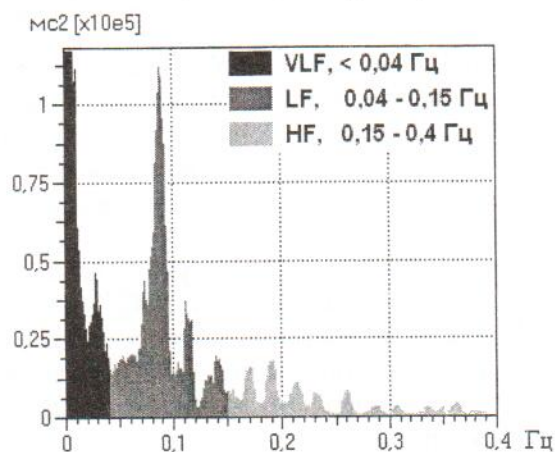


Рис. 2. Спектр потужності

Піки на спектрограмі відповідають:

- умовно високочастотним коливанням (діапазон 0,15–0,4 Гц);
- низькочастотним коливанням (діапазон 0,04–0,15 Гц);
- інфранизькочастотним коливанням (діапазон менше 0,04 Гц).

Залежно від амплітуди дихальних і недихальних періодичних складових змінюється й характер спектра.

Стандартний набір параметрів спектрального аналізу, визначуваних на підставі ряду RR-інтервалів, наведений у таблиці.

Перетворення Фур'є і ряди Фур'є – прекрасний математичний апарат для фізичної інтерпретації процесів при аналізі сигналів, що їх характеризують. Проте перетворення Фур'є вимагає постійної частоти гармонічних складових, а також цілого числа періодів за весь проміжок спостереження.

Основна формула перетворення Фур'є не враховує того, що амплітуда частотної компоненти сигналу може змінюватися з часом, “розмазуючи” локальну зміну амплітуди на весь час спостереження. Як наслідок, перетворення Фур'є,

наприклад, не відрізняє сигнал, що є сумою двох синусоїд з різними частотами, від сигналу, який складається з тих самих синусоїд, що включаються послідовно одна за одною. Можна стверджувати, що перетворення Фур'є добре локалізує частоту, але без розділення в часі й є інтегральною характеристикою часового ряду за весь час спостереження.

Отже, перед дослідниками встає задача використання нового методу, за допомогою якого можна ефективно аналізувати сигнали зі спектральними компонентами, що змінюються в часі.

Частина зазначених труднощів подолається під час використання віконного перетворення Фур'є. Проте, нескінченно коливна базисна функція – синусоїдальна хвиля – не дозволяє одержувати по-справжньому локалізовану інформацію.

Одним з ефективних розв'язків проблеми частотно-часової локалізації є застосування методу головних компонент для аналізу часових рядів [3].

#### Частотні параметри для коротких записів (5 хв)

Величина	Опис	Частотний діапазон, Гц
TP (5-min total power), $mc^2$	Загальна спектральна потужність, яка відображає мінливість RR-інтервалів на часовому сегменті	$\leq 0,4$
VLF (very low frequency), $mc^2$	Спектральна потужність дуже низьких частот	До 0,04
LF (low frequency), $mc^2$	Спектральна потужність низьких частот	0,04 – 0,15
HF (high frequency), $mc^2$	Спектральна потужність високих частот	0,15 – 0,4
LF/HF	Відношення низькочастотної складової до високочастотної	–

Розглянемо можливість використання методу головних компонент для аналізу варіабельності ритму серця і одержані результати.

#### Методика досліджень

Застосування методу головних компонент у задачах аналізу одновимірних часових рядів полягає в перетворенні одновимірного ряду в багатовимірний, дослідженні одержаної багатовимірної траєкторії методом головних компонент і подальшому відновленні одновимірного ряду.

Багато природних процесів можуть бути описані за допомогою функцій, що складаються з таких складових:

$f(t) = f_T(t) + \sum f_n(t) + \varepsilon(t)$ ,  $t \in [0, T]$ ,  
де  $f_T(t)$  – повільна нерегулярна складова (тренд);  
 $\sum f_n(t)$  – сума періодичних складових (варіацій);  
 $\varepsilon(t)$  – випадковий шум, описуваний випадковим процесом певного вигляду.

За допомогою методу головних компонент можна виділити окремі складові початкового ряду, такі, як повільний тренд, періодичні складові і випадкові варіації, не вимагаючи при цьому ніякої апріорної інформації про структуру часового ряду, наявність або відсутність у ньому певних періодичних компонент, а також про закон зміни цих компонент у часі.

Опишемо базовий алгоритм методу.

1. Задамо одновимірний часовий ряд довжини  $N$ .
2. Перетворимо початковий одновимірний часовий ряд у багатовимірний. Задавшись деяким числом  $d < N/2$  (лаг), значеннями початкового ряду послідовно заповнимо рядки матриці  $X$ . Перший рядок містить перші  $d$  елементів ряду, другий – з другого елемента по  $d+1$  і так далі, поки не вичерпається початковий ряд.

3. Проведемо центрування (віднімання вибірових середніх) і нормування (діленням на вибірові стандарти) стовпців матриці  $X$ .

4. Обчислимо кореляційну матрицю  $R = XX^T$ .

5. Проведемо розкладання кореляційної матриці на власні числа  $L$  і власні вектора  $P$ . Розкладання матриці  $R = PLP^T$  дає діагональну матрицю власних чисел  $L$  і ортогональну матрицю власних векторів  $P$  матриці  $R$ .

6. Досліджуємо головні компоненти матриці  $Y = XP$ , визначимо їх внесок у початковий ряд і відновимо за вибраними головними компонентами початковий ряд.

На кроці 6 є можливість зробити безпосередній пошук періодичних компонент, фільтрацію або згладжування ряду, вибираючи відповідні значущі компоненти  $Y_i$ . Оскільки матриця  $P$

ортогональна, то можна відновити початкову матрицю  $X = YP^T$ , використовуючи при цьому вибрані головні компоненти  $Y_i$ .

Найважливішими достоїнствами методу головних компонент є:

- використання методу не вимагає апріорного знання структури аналізованого часового ряду;
- базові функції методу породжуються досліджуванним рядом, оскільки є власними векторами  $R$ ;
- можлива оцінка не тільки миттєвих частоти і амплітуди періодичних компонент початкового часового ряду, але й їх фази;
- повне або часткове відновлення часового ряду можливе за інформативними компонентами, що призводить до вибіркової фільтрації або згладжування початкового часового ряду.

Приведемо приклад застосування методу головних компонент для аналізу реального ряду RR-інтервалів. На рис. 3 показана початкова кардіоритмограма, що складається з 286 кардіоінтервалів загальною тривалістю 5 хв.

Використаємо значення лага  $d=20$ , що дорівнює кількості потрібних компонент. Після розкладання кардіоритмограми і групування періодичних компонент одержимо складові, показані на рис. 4–10.

Для кожної періодичної складової обчислимо усереднені період коливань і частоту.

Аналіз одержаних результатів дає детальну інформацію про структуру системи керування ритмом серця.

Наприклад, у частотний діапазон коливань низької частоти LF (діапазон 0,04 – 0,15 Гц) потрапили відразу три незалежні періодичні компоненти з частотами 0,05 Гц (ГК3), 0,1 Гц (ГК6+7) і 0,133 Гц (ГК4+5). Для визначення фізіологічних механізмів регуляції, відповідних кожній періодичній компоненті, структури системи керування ритмом у кожному частотному діапазоні необхідно продовжити початі дослідження, попередні результати яких викладені у даній статті.

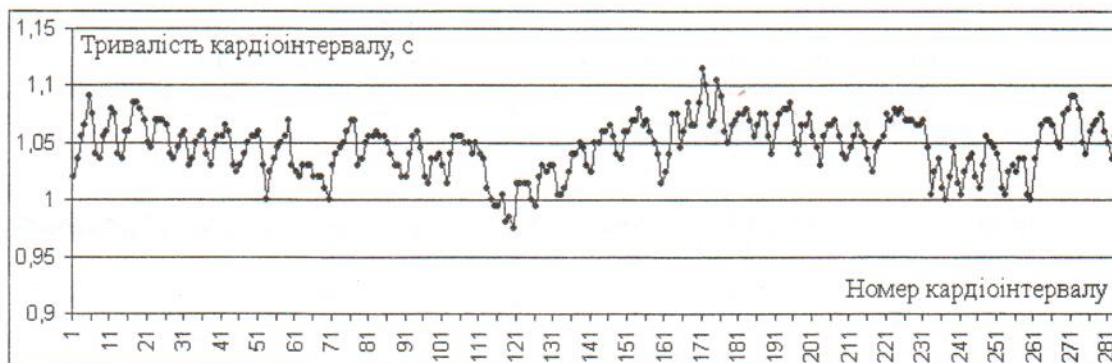


Рис. 3. Початкова кардіоритмограма

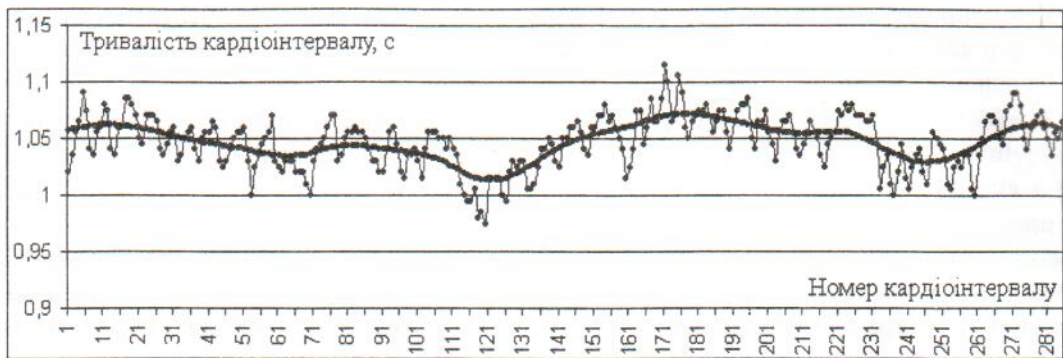


Рис. 4. Повільний тренд початкової кардіоритмограми

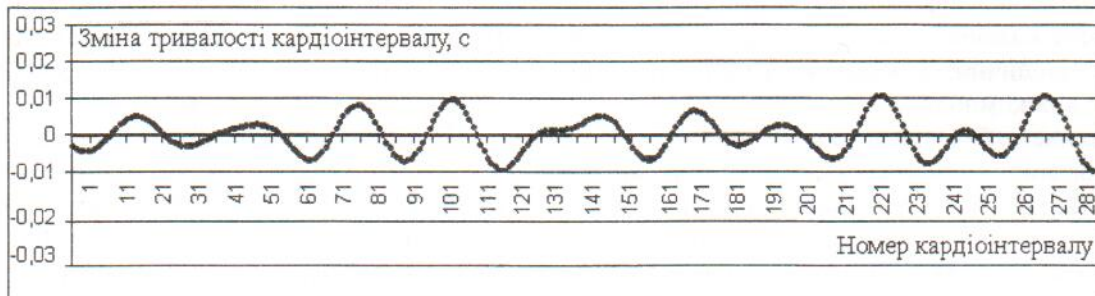


Рис. 5. Головні компоненти 1 і 2 (період коливань 30 с, частота 0,033 Гц)

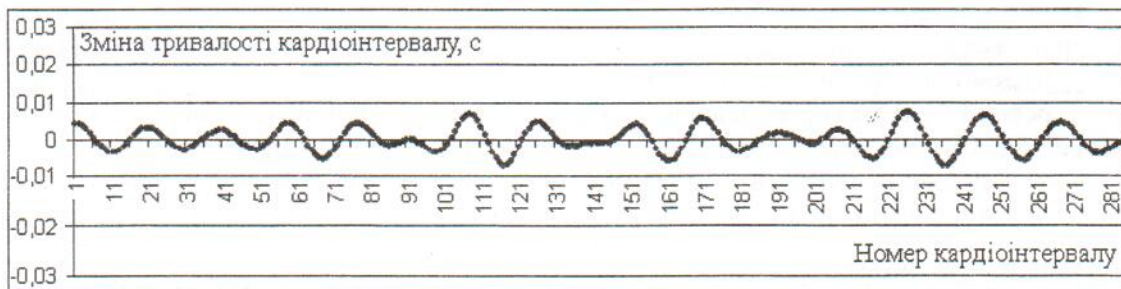


Рис. 6. Головна компонента 3 (період коливань 20 с, частота 0,05 Гц)

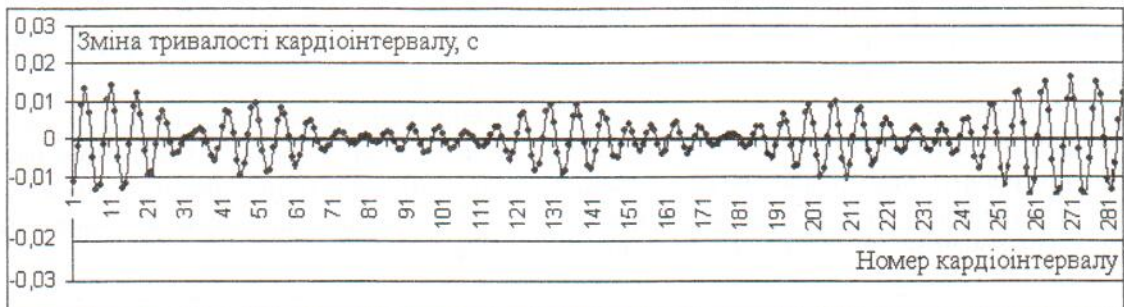


Рис. 7. Головні компоненти 4 і 5 (період коливань 7,5 с, частота 0,133 Гц)

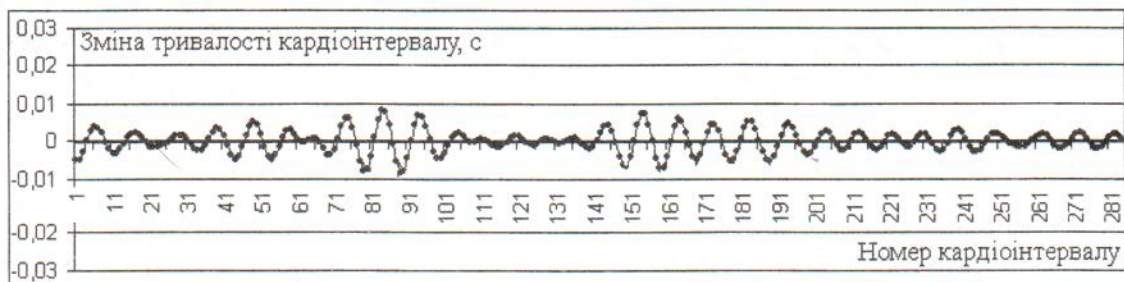


Рис. 8. Головні компоненти 6 і 7 (період коливань 10 с, частота 0,1 Гц)

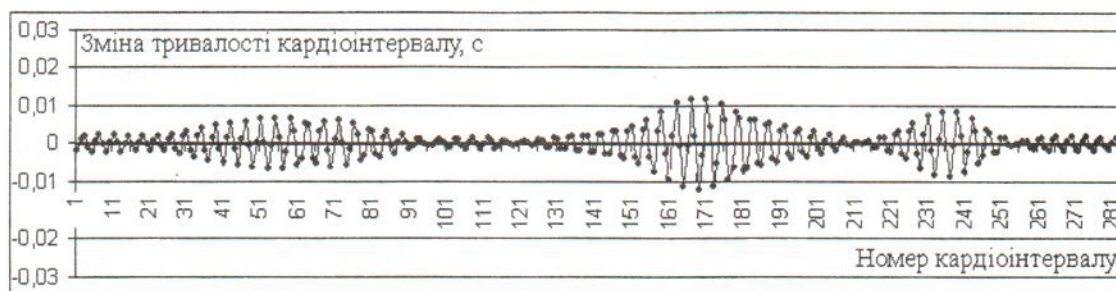


Рис. 9. Головні компоненти 8 і 9 (період коливань 4,4 с, частота 0,227 Гц)

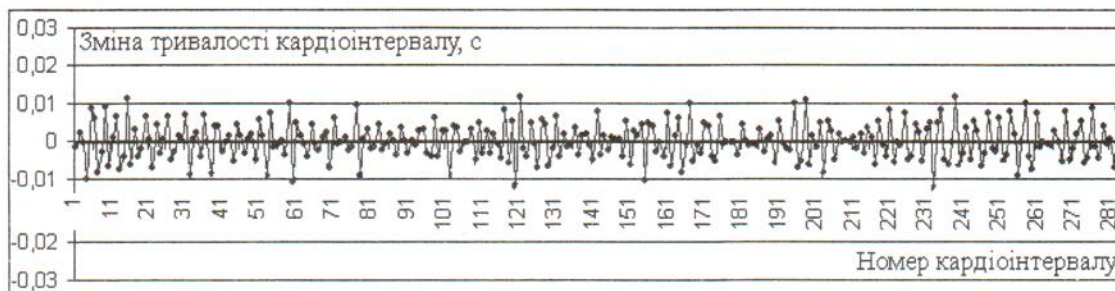


Рис. 10. Сума залишених компонент 10-20 як шумова складова

### Висновки

Метод головних компонент є ефективним методом аналізу сигналів, що складаються з різночастотних змінних у часі періодичних складових.

Перевагою методу головних компонент перед спектральним аналізом є можливість отримання динаміки зміни кожної частотної компоненти за час спостереження.

Під час використання методу головних компонент зменшується потреба в самому спектральному аналізі, оскільки необхідні стандартні показники можуть бути обчислені безпосередньо на основі одержаних частотних компонент.

### Список літератури

1. Коркушко О.В., Шатило В.Б., Писарук А.В. Методы анализа и возрастные нормы variability ритма сердца // Анализ variability ритма сердца в клинической практике: Материалы 1-й Междунар. науч. конф., 24-25 окт. 2002 г. – К.: ИПЦ «Алкон», 2002. – 216 с.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Приложения корреляционного и спектрального анализа: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 312 с.
3. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского – С. Пб.: Санкт-Петербург. ун-т, 1997. – 180 с.

Стаття надійшла до редакції 17.12.03.

В.П. Бабак, А.В. Чиликин

Применение метода главных компонент для анализа variability ритма сердца

Рассмотрены основные методы, применяемые в настоящее время для анализа variability ритма сердца. Проведен анализ их недостатков. Предложено использование метода главных компонент для анализа variability ритма сердца. Показаны его преимущества перед существующими методами анализа.

V.P. Babak, A.V. Chilikin

Application of the principal components method for the analysis of heart rate variability

The basic methods used now for the analysis of heart rate variability are considered, the analysis of their lacks is performed. Use of a principal components method for the analysis of heart rate variability is proposed. Its advantages are shown in comparison with existing methods of the analysis.