

АНАЛИЗ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПРИ АРИТМИЯХ С СОХРАНЕННЫМ СИНУСОВЫМ РИТМОМ

Н.И. Яблчанский, А.В. Мартыненко

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина

РЕЗЮМЕ

Предложен метод, расширяющих границы приложений технологии вариабельности сердечного ритма (ВСР) с ее распространением на аритмии при сохраненном синусовом ритме. В основу разработанного метода положена центральная теорема спектрального анализа, связывающая интеграл от квадрата функции с мощностью спектра (ТР) ВСР, открытая А.М.Ляпуновым в 1896 г. Предложенный метод точно и достоверно разделяет смешанную модельную запись на независимые источники; при разделении на независимые источники реальных записей ВСР удается выделить гармонические и стохастические независимые источники, что подтверждает точность процедуры и адекватность ее результатов физиологическим представлениям о природе ВСР; вычисленные для разделенных источников величины общей мощности хорошо коррелируют с ожидаемыми величинами ТР ВСР для данных возрастных групп. Метод расширяет приложения технологии ВСР в медицинской практике.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вариабельность сердечного ритма; аритмии сердца

Технология вариабельности сердечного ритма (ВСР) из разряда теоретических в последние годы перешла в практические и все шире используется в самых разных разделах медицины [4, 5].

При этом на практические приложения технологии ВСР накладываются серьезные ограничения, а именно, приложением к сердечным интервалам с сохраненным синусовым ритмом и частотой экстрасистол не более 3 за 1 мин. [6].

Известно, что не только при патологических, но и в условиях физиологической нормы, синусовый ритм в чистом виде больше правило, чем исключение [1, 2]. По данным суточного мониторирования электрокардиограммы (ЭКГ) у здоровых наджелудочковые и желудочковые экстрасистолы находят у каждого второго, а в пожилом и старческом возрасте частота их обнаружения увеличивается до 100%. С возрастом возрастает также частота сложных желудочковых аритмий, которая в общей популяции составляет 10-15% случаев. Кратковременные, до 5 комплексов, наджелудочковые тахикардии при АЭКГ наблюдаются у каждого пятого. Если более 5, только у каждого двадцатого. При ЧСС до 120 уд/мин приступы остаются незамеченными или, по крайней мере, легко переносятся. Кратковременные желудочковой тахикардии с частотой до 180 уд/мин в 5% случаях можно встретить во всех возрастных группах.

Все изложенное требует разработки методов, расширяющих границы приложений технологии ВСР с ее

распространением на аритмии при сохраненном синусовом ритме. В настоящей статье решена данная задача.

Теория

Формально проблема разделения исходной ритмограммы (временного ряда) ЭКГ на кластеры легко решается современными методами кластерного анализа. В наибольшей степени для последующего анализа подходит метод К-средних, где для наперед заданного числа кластеров K отыскивается такое распределение членов кластеров, которое минимизирует вариабельность внутри кластера и максимизирует вариабельность между кластерами. Степень кластеризации характеризуется величиной F . Однако, проблема состоит в том, что анализ величины F при различном количестве заданных кластеров не позволяет установить количество независимых источников, формирующих исходную ритмограмму. Для выделения независимых источников используется предлагаемый в статье алгоритм, позволяющий найти решение указанной проблемы не во временной, а в спектральной области.

Центральная теорема спектрального анализа, связывающая интеграл от квадрата функции с мощностью спектра (ТР) ВСР, была открыта А.М. Ляпуновым в 1896 г. и впервые опубликована в Известиях математического общества Харьковского университета. Дискретный аналог указанной теоремы для N значений функции f_N при сохранении первых M гармоник имеет вид [3]:

$$\sum_N (f_n)^2 = \frac{N}{2} \left(\frac{1}{2} A_0^2 + \sum_M (A_m^2 + B_m^2) \right) + \varepsilon(M), \quad (1)$$

где, A_m, B_m – коэффициенты Фурье функции f_N ; $\varepsilon(M)$ – ошибка разложения функции.

Представляя исходную функцию K кластерами перепишем (1) в виде:

$$\sum_N (f_n)^2 = \frac{N}{2} \sum_K \left(\frac{1}{2} a_0^2 + \sum_M (a_m^2 + b_m^2) \right) + \sum_K (\varepsilon_k(M)), \quad (2)$$

где, a_m, b_m – коэффициенты Фурье для каждого из K кластеров, объединение которых представляет функции f_N ; $\varepsilon_k(M)$ –

ошибка разложения для k -ого кластера.

Тогда минимум функционала

$$K = \min \left\{ \sum_K (\varepsilon_k(M)) \right\}, \quad (3)$$

будет решающим правилом для выделения K независимых источников в исходной ритмограмме, т.к. минимальная ошибка $\varepsilon(M)$ реализуется только при собственном разложении гармонического сигнала и максимизируется при произвольном объединении сигналов от гармонических источников.

разночастотных гармонических источников (рис. 1.): $1+0.2\sin(10\pi t)$ и $2+0.2\sin(20\pi t)$.

Разделение на 2 независимых сигнала показано на рис. 2. Спектральное разложение в этом случае дает минимальную ошибку $\varepsilon = 0.2\%$ и соответствует точному представлению независимых источников.

Попытка разделение исходного сигнала (рис. 3.) на 3 независимых источника представляет комбинацию действительных сигналов, формирующих исходный, и дает ошибку $\varepsilon = 22.8\%$, т.е. максимизирует ее.

Модельная задача

Проиллюстрируем изложенный метод на простейших примерах: объединение 2 и 3 гармонических сигналов.

Объединение двух сигналов представляет собой перемежающийся сигнал от 2-х

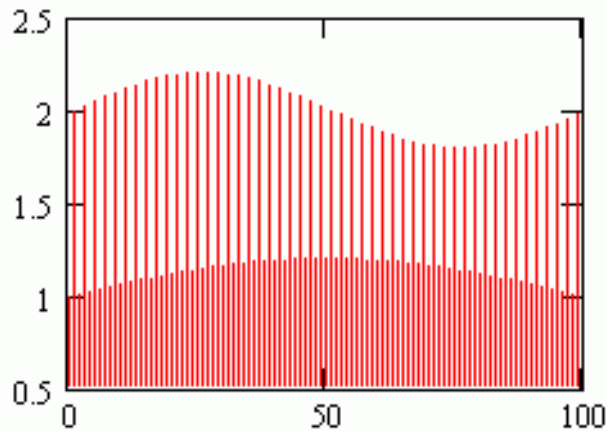


Рис. 1. Объяснения в тексте

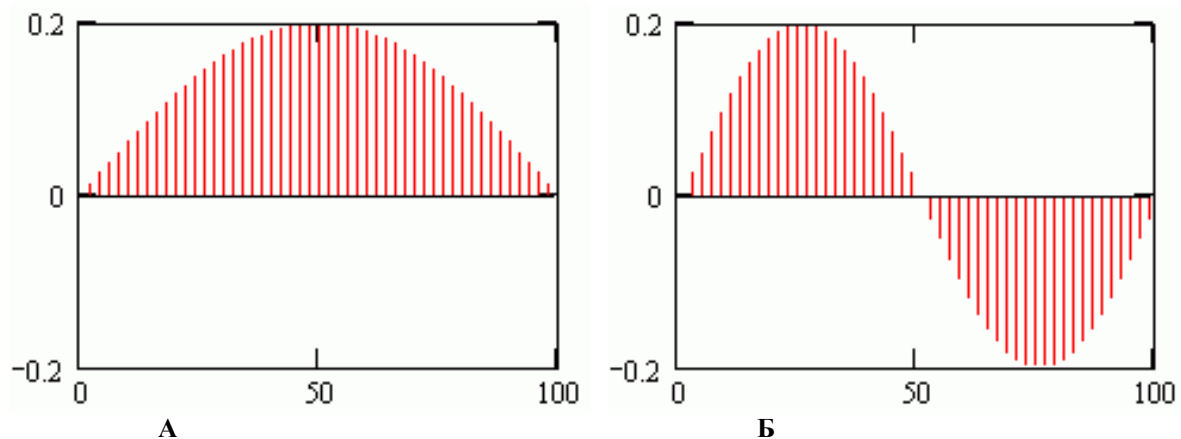
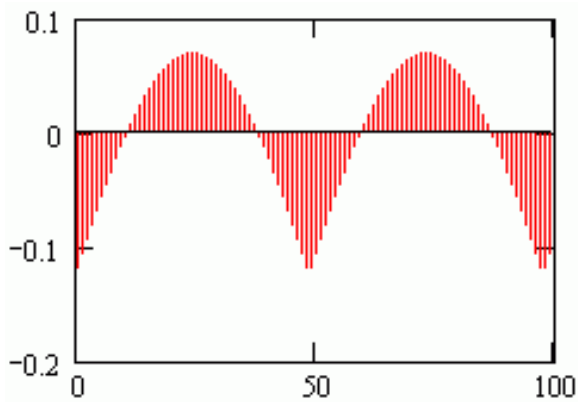
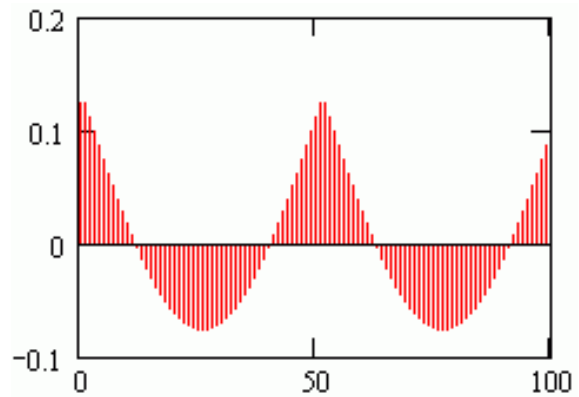


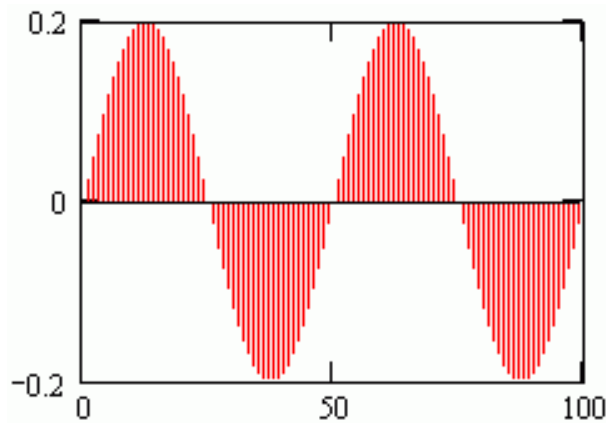
Рис. 2. (а, б). Объяснения в тексте



А



Б



В

Рис. 3. (а, б, в). Объяснения в тексте

Легко видеть, что объединение 2-х независимых источников производится достоверно и точно.

Объединение трех сигналов представляет собой комбинацию сигналов от 3-х

разночастотных гармонических источников, полученную с помощью их последовательной циклической перестановки (рис. 4.): $1+0.2\sin(10\pi t)$, $2+0.2\sin(20\pi t)$ и $3+0.2\sin(30\pi t)$.

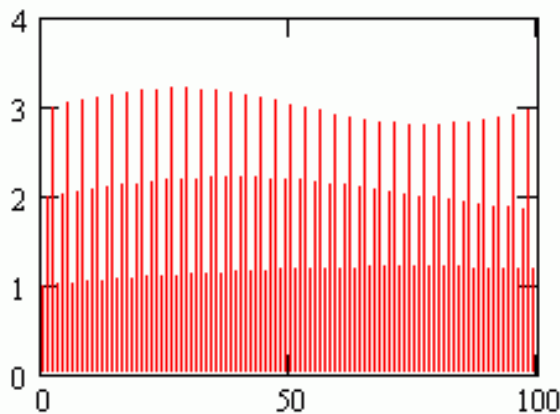


Рис. 4. Объяснения в тексте

Попытка разделения на 2 независимых сигнала показана на рис. 5. Ошибка спектрального разложения в этом случае

максимальна $\varepsilon=22.3\%$, т.к. в разложении получена комбинация сигналов от независимых источников.

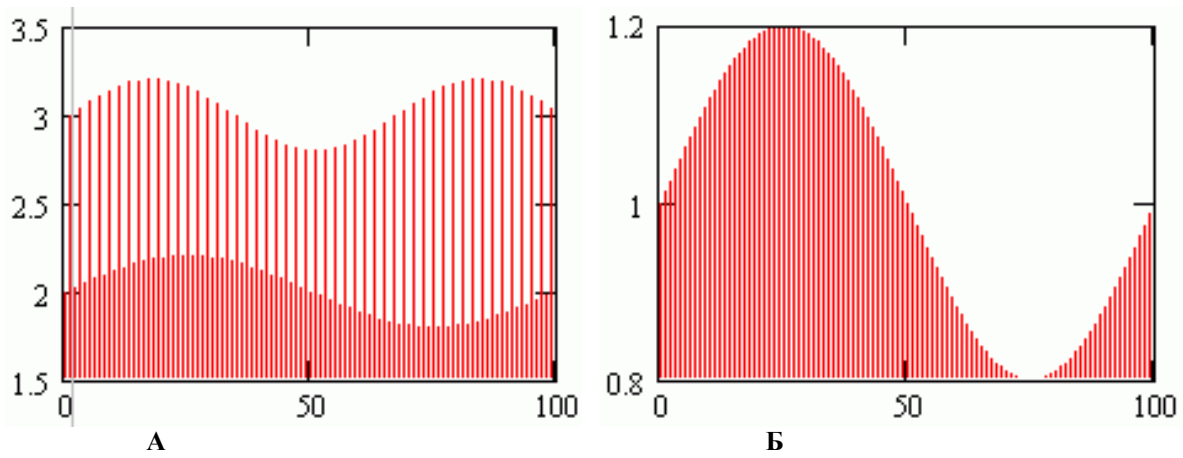


Рис. 5. (а, б). Объяснения в тексте

Разделение исходного сигнала (рис. 4.) на 3 независимых источника позволяет точно определить истинные составляющие и минимизирует ошибку $\varepsilon=0.2\%$. Разделение на кластеры и в этом случае выполняется абсолютно точно.

Попытка разделения на 4 независимых сигнала снова максимизирует ошибку спектрального разложения $\varepsilon=18.6\%$, т.к. в разложении получена комбинация сигналов от независимых источников.

Видим, что разделение объединения 3-х независимых источников также производится достоверно и точно.

Реальная задача

Рассмотрим случай юношеской аритмии: 5-минутная запись здорового мальчика 12 лет (рис. 6.).

Последовательное разделение исходного сигнала (рис.6) на 2-5 кластеров дает следующие ошибки разложения: 2 кластера – $\varepsilon=2.9\%$; 3 кластера – $\varepsilon=1.7\%$; 4 кластера – $\varepsilon=1.0\%$; 5 кластеров – $\varepsilon=18.2\%$. В соответствии с этим можно утверждать, что мы наблюдаем 4 независимых источника, формирующих ритмограмму (рис.6). Анализ скатерограммы этой записи подтверждает вывод (рис. 7.).

Интересно проанализировать характер сигналов, формирующих ритмограмму ЭКГ. Для этого рассмотрим спектры независимых источников. Например, при разделении ритмограммы на 2 независимых источника, их спектры выглядят сильно зашумленными случайной компонентой ВСП (рис. 8.).

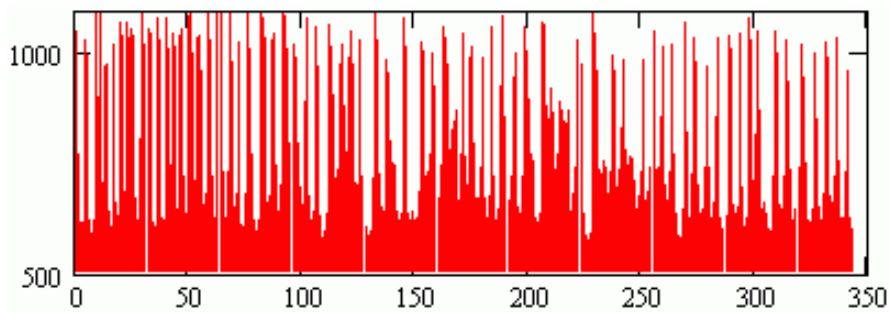


Рис. 6. Объяснения в тексте

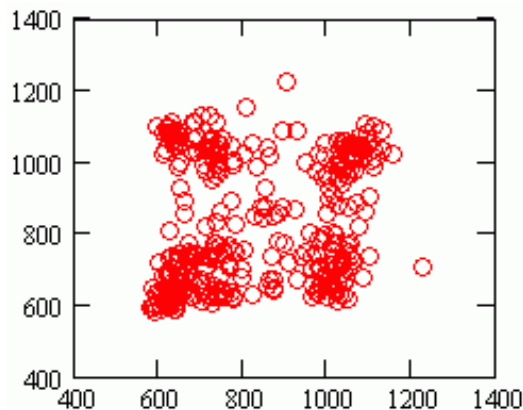


Рис. 7. Объяснения в тексте

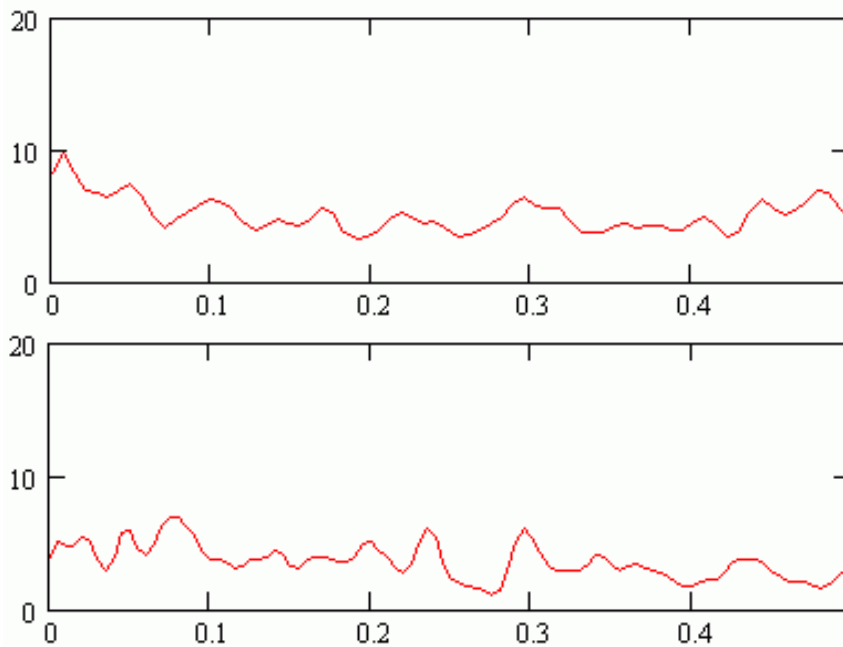


Рис. 8. Объяснения в тексте

Тоже в случае разделения на 3 и 5 сигналов. Только при выделении 4 независимых сигналов удается идентифицировать 1 гармонический источник и 3 стохастические компоненты формирующие ритмограмму ЭКГ. На рис. 9. представлены спектры 1 гармонического источника (синусового узла) и суммарный спектр от 3-х стохастических компонент.

На рис. 10. для сравнения показан спектр от стохастического источника с нормальным законом распределения.

Благодаря указанным разложениям может быть корректно подсчитана и общая мощность спектра для ритмограммы рис.6: ТР было уменьшено от 15290 мс² для спектра исходной ритмограммы до 4930 мс² при делении на 4 независимых источника. Последнее значение ТР гораздо ближе к среднему значению ТР для данной возрастной категории.

Аритмия. Пациентка Л. 60 лет, аритмия. Ритмограмма дана на рис. 11.

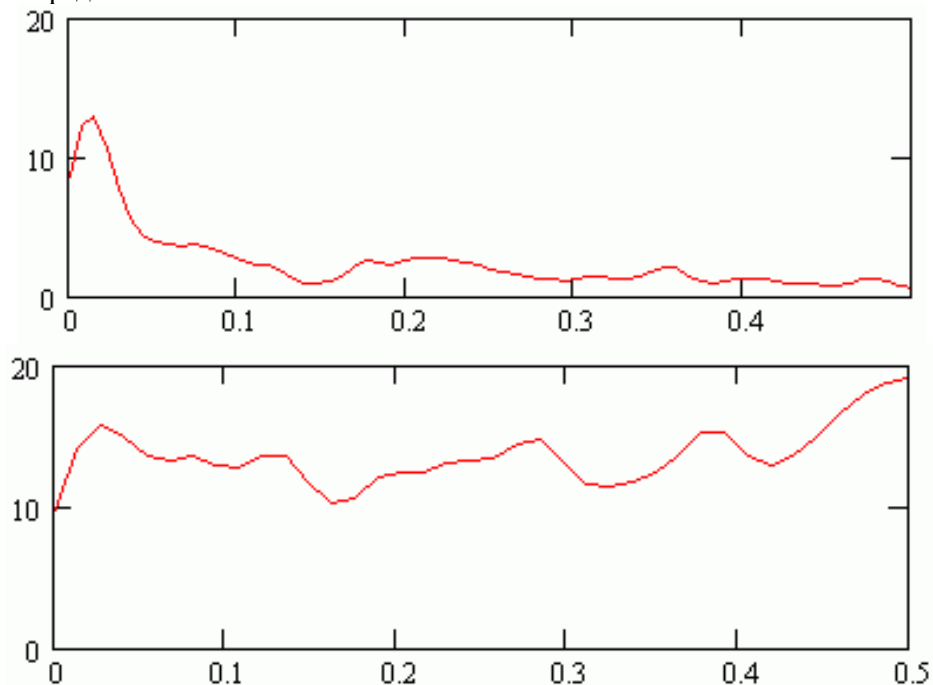


Рис. 9. Объяснения в тексте

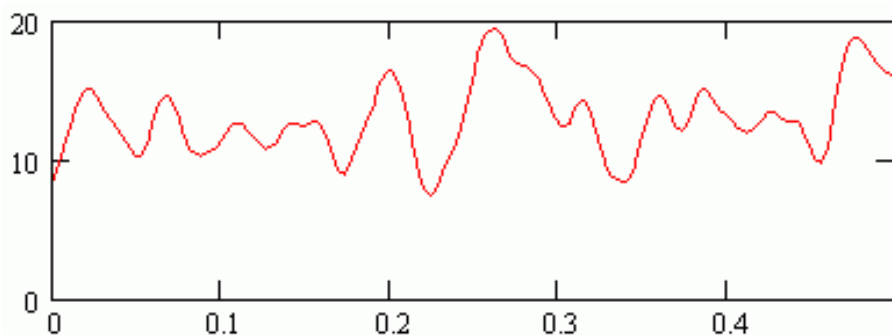


Рис. 10. Объяснения в тексте

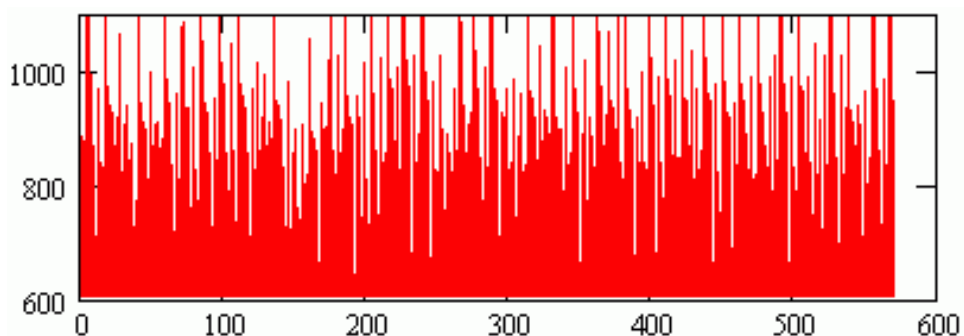


Рис. 11. Объяснения в тексте

Анализ скатерограммы (рис. 12.) не позволяет выявить количество независимых источников.

Последовательное разделение исходного сигнала (рис.11) на 2-4 кластеров дает следующие ошибки разложения: 2 кластера – $\epsilon=2.2\%$; 3 кластера – $\epsilon=16.0\%$; 4 кластера – $\epsilon=21.1\%$. Можно утверждать, что мы наблюдаем 2 независимых источника, формирующих ритмограмму ЭКГ (рис. 11).

Спектры при 2-х сигнальном делении свидетельствуют о наличии одного гармонического и одного стохастического источников (рис. 13.).

Подсчет ТР при двухсигнальном разложении позволяет существенно скорректировать его значение от 14750 мс^2 в первоначальном варианте до 2020 мс^2 при двухсигнальном разложении.

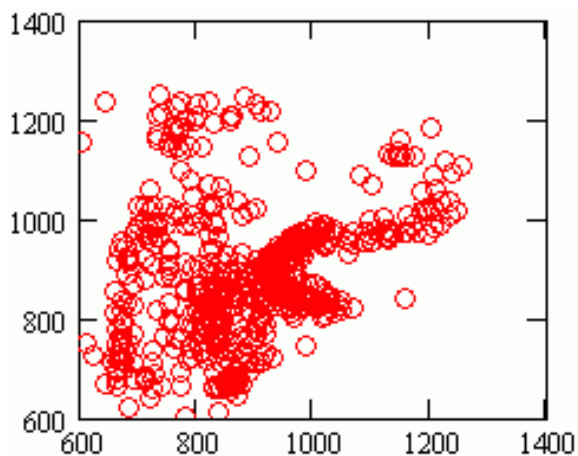


Рис. 12. Объяснения в тексте

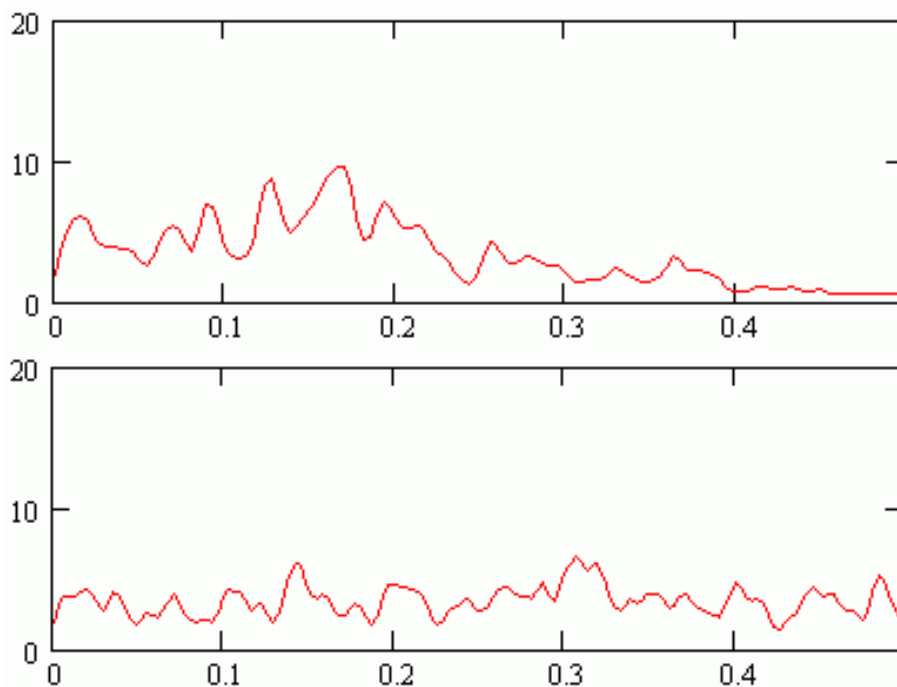


Рис. 13. Объяснения в тексте

Выводы

Предложен математический метод, позволяющий использовать спектральные методы ВСР для анализа записей с аритмиями.

В статье показано, что:

1. предложенный метод точно и достоверно разделяет смешанную модельную запись на независимые источники;
2. при разделении на независимые источники реальных записей ВСР удается выделить гармонические и стохастические независимые источники, что подтверждает точность процедуры и адекватность ее результатов физиологическим представлениям о природе ВСР;
3. вычисленные для разделенных источников величины общей мощности хорошо коррелируют с ожидаемыми величинами

- ТР ВСР для данных возрастных групп;
4. дополнительное исследование требует вопрос о целесообразности включения стохастической компоненты спектра в оценку ТР ВСР.

Так как в анализе ВСР рассматривается регуляторное воздействие на источник гармонического сигнала – синусовый узел, можно попытаться ограничиться только гармонической частью спектра. Тогда ТР ВСР в первом случае будет 2550 мс^2 , а во втором – 1400 мс^2 , что хорошо совпадает со средними значениями этого показателя для указанных возрастных категорий.

Разработанный метод может быть использован и для корректной оценки ТР ВСР и детального анализа спектральных характеристик синусового узла при аритмиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добове моніторингування ЕКГ. Рекомендації українського товариства кардіології. -К.: - 2002. - 76 с.
2. Яблучанский Н.И., Мартыненко А.В., Исаева А.С., и др. Исследуем регуляторные процессы. Для настоящих врачей. - Донецк: ЧП Бугасова. - 2005. - 196 с.
3. Хемминг Р.В. Численные методы. - М.:Наука. - 1972. - 400 с.
4. Aubert AE, Ramaekers D. // Acta cardiol. - 1999. - Vol. 5(3). - P. 107-120.
5. Baevskii R.M. Human Physiology. - 2002. - Vol. 28(2). - P. 70-82.
6. Task force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. // Circulation. - 1996. - Vol. 93. - P. 1043-1065.

АНАЛІЗ ВАРІАБЕЛЬНОСТІ СЕРЦЕВОГО РИТМУ ПРИ АРИТМІЯХ ЗІ ЗБЕРЕЖЕНИМ СИНУСОВИМ РИТМОМ

РЕЗЮМЕ

Запропоновано метод, що розширює межі застосування технології варіабельності серцевого ритму (ВСР) з її розповсюдженням на аритмії при збереженому синусному ритмі. В основу розробленого методу покладена центральна теорема спектрального аналізу, що зв'язує інтеграл від квадрата функції з потужністю спектру (ТР) ВСР, відкрита А.М.Ляпуновим у 1896 р. Запропонований метод точно і достовірно розділяє змішаний модельний запис на незалежні джерела; при розділенні на незалежні джерела реальних записів ВСР вдається виділити гармонійні і стохастичні незалежні джерела, що підтверджує точність процедури і адекватність її результатів фізіологічним уявленням про природу ВСР; обчислені для розділених джерел величини загальної потужності добре корелюють з очікуваними величинами ТР ВСР для даних вікових груп. Метод розширює застосування технології ВСР в медичній практиці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: варіабельність серцевого ритму, аритмії серця

HEART RATE VARIABILITY ANALYSIS AT ARRHYTHMIA WITH SAVED SINUS RHYTHM

M.I. Yabluchansky, A.V. Martynenko
V.N. Karazin Kharkov National University, Ukraine

SUMMARY

The method extending spectral analysis of heart rate variability (HRV) application for patients with sinus arrhythmia was proposed. The method is based on Lyapunovs' central theorem of spectral analysis that bands together total power (TP) and integral from quadratic of function. Proposed method exactly split mixed model signal on true independent sources; that we obtain stochastic and harmonic sources when we split real HRV records; that TP of harmonic source good correlated with expected TP value for patients' age group. Thus method extends HRV technology for medical practice.

KEY WORDS: heart rate variability, arrhythmia