

Физика волновых процессов и радиотехнические системы

УДК 615.471
DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.192-199

Дата поступления: 08.11.2019
Дата принятия: 04.12.2019

Метод фазово-частотного спектрального анализа электрокардиосигнала в задачах домашней телемедицины

Т.Ф. Щербакова, С.С. Седов, Р.И. Якупов

Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева - КАИ
420111, Российская Федерация, г. Казань
ул. К. Маркса, 10

В данной работе рассматривается метод фазово-частотного спектрального анализа электрокардиосигнала для определения аритмий. Описан выбор спектральных параметров для различения «нормальных» и «патологических» электрокардиографических сигналов. Приведены примеры построенных спектров различных реальных сигналов. Разработан алгоритм обнаружения аритмий и дальнейшего их различения. Показатели, полученные при спектральном анализе, планируется использовать для предотвращения развития угрожающих видов аритмий и их своевременного выявления.

Ключевые слова: фазово-частотный спектр, амплитудно-частотный спектр, быстрое преобразование Фурье, электрокардиограмма, аритмия, граничная частота, порог принятия решения, вероятность принятия ошибочного решения, отношение ВЧ/НЧ.

Проблемы, относящиеся к сердечно-сосудистым заболеваниям, всегда носили злободневный характер и по статистике являются причиной 57 % общей смертности в России. В связи с этим задачи разработки высокоэффективных методов диагностики состояния сердца приобретают все большую актуальность.

Благодаря развитию систем автоматизированной обработки электрокардиосигнала (ЭКС), у нас есть возможность разработать концептуально новые медико-диагностические приборы, спроектировать и отладить канал связи для беспроводной передачи данных и проанализировать состояние сердца, используя портативный анализатор аритмий.

В данной работе рассматриваются ЭКС здоровых людей и людей, у которых присутствует нарушение сердечного ритма, а именно нарушение морфологии QRS-комплекса, которое принято называть экстрасистолой. А также другие параметры сердечного ритма, которые могут отличаться в зависимости от вида аритмии или состояния человека. Например, это могут быть параметры, характеризующие изменения Р и Т зубца и вариабельность сердечного ритма. В данной работе рассмотрим такие виды аритмий как бигеминия, тригеминия и пароксизмальная наджелудочковая тахикардия:

- Нарушение сердечного ритма называют бигеминией тогда, когда экстрасистолы следуют в строгом порядке за каждым циклом основного ритма,

то есть фиксируется чередования синусовых и экстрасистолических циклов в соотношении 1:1.

- Тригеминия фиксируется в двух ее проявлениях, а именно:

1. Две парные экстрасистолы, которые следуют подряд за одним циклом основного ритма. В таком случае фиксируется чередование синусовых и экстрасистолических циклов в соотношении 2:1. И данный вариант расценивается как наиболее опасный и более сложный вид патологии.

2. Второй вариант, когда экстрасистолы идут подряд за двумя циклами основного сердечного ритма и фиксируется их соотношение 1:2.

- Пароксизмальная наджелудочковая (в дальнейшем ПНТ) тахикардия обладает признаками: ЧСС от 100–250 ударов в минуту. Зубец Р может предшествовать желудочковому комплексу, может сливаться с комплексом QRS или следовать за ним, а также может отличаться по форме, амплитуде и по полярности в сравнении с синусовым ритмом [4].

Для автоматического анализа ритма сердца необходимо владеть информацией не только о длительностях последовательных RR-интервалов, но и информацией о форме QRS-комплексов (морфологии). При этом, задача сводится к точному выявлению является ли очередной QRS-комплекс нормальным или же является патологическим [2].

Для разработки алгоритма различения ЭКГ-сигналов на основе спектральных параметров QRS-комплекса и параметров других элементов

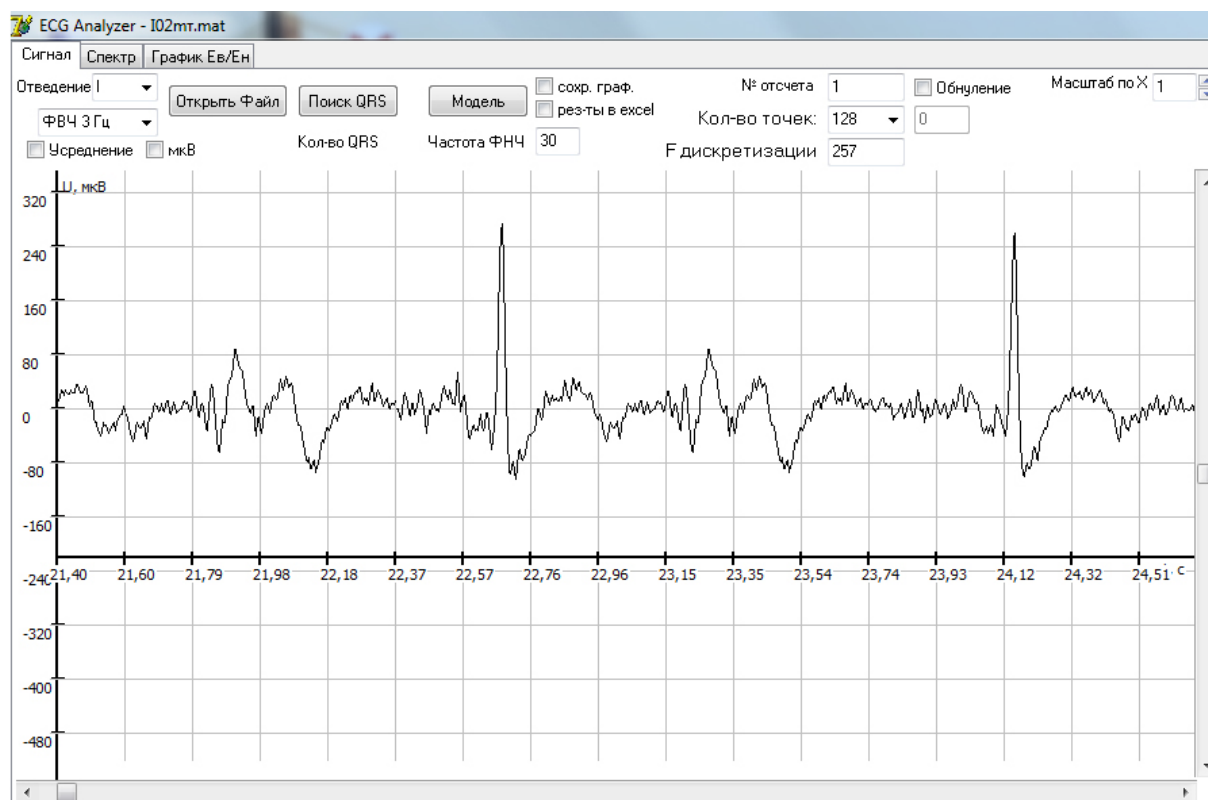


Рис. 1. Исходный ЭКГ сигнал (бигеминия)

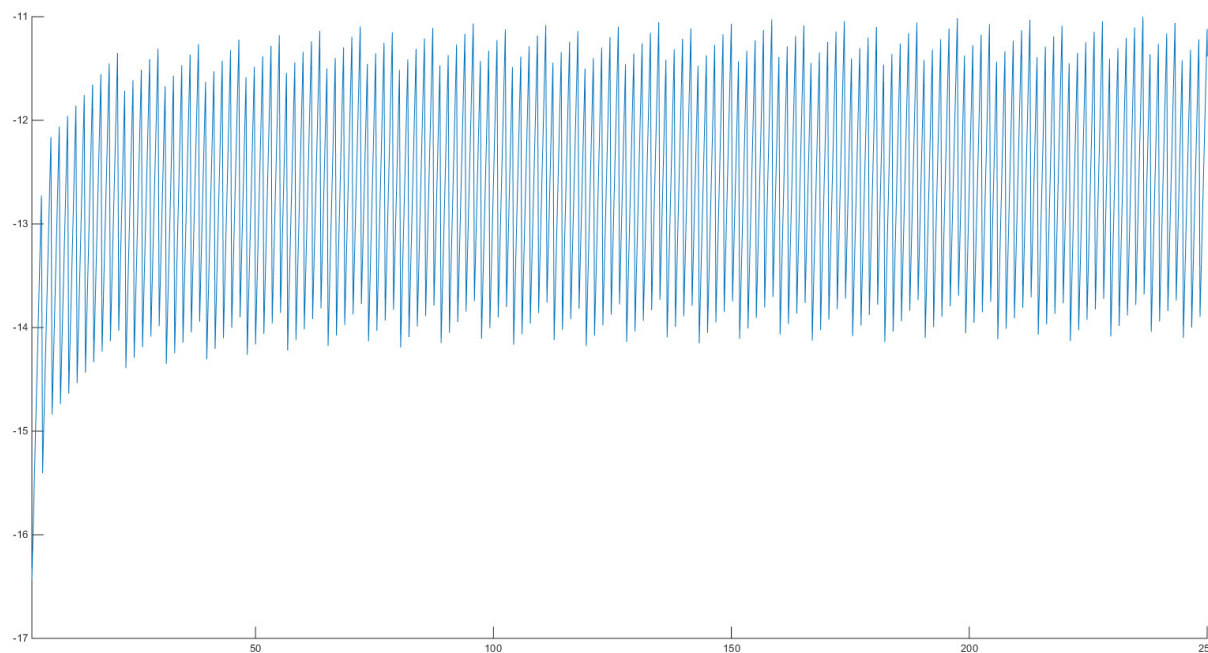


Рис. 2. Фазово-частотный спектр ЭКГ сигнала с бигеминией

ЭКС (Р и Т зубцы), а также параметров variability сердечного ритма нужно определить порого принятия решения [1].

Наш алгоритм обнаружения аритмий и дальнейшего их различения имеет следующий порядок действий:

- С помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ), проводимого с участками ЭКС длительно-

стью 1 минута, мы получили их спектры. Построение фазовых спектров проводилось для ЭКС с патологией и ЭКС здорового человека.

- Построение графиков отношения энергий высокочастотной (ВЧ) части спектра к низкочастотной (НЧ).

- Нахождение математических ожиданий и дисперсий отношений энергий ВЧ части спектра к НЧ.

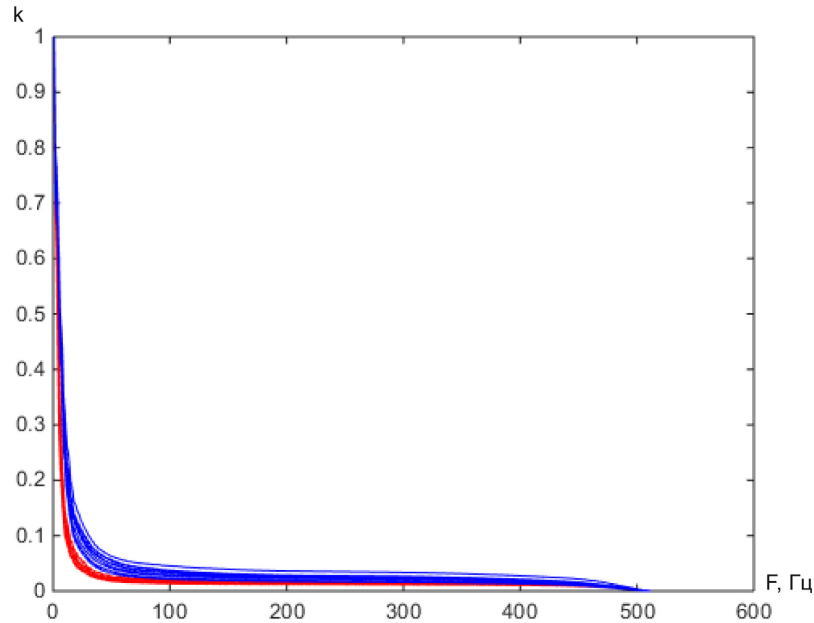


Рис. 3. Изменения коэффициента K от $f_{гр}$. Верхняя группа – норма; нижняя – бигеминия

- Построение гистограмм распределений для непосредственного определения порога принятия решения.

- Реализация автоматического определения порога принятия решения с помощью аппаратных средств Matlab.

Для анализа использовали 40 реализаций ЭКС, взятых из базы данных ресурса PhysioNet [3]. Пример исходного сигнала и его спектр представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Как мы видим из иллюстраций, используемых ЭКГ-сигналов, чередование паталогических и нормальных QRS-комплексов фиксируется в соотношении 1:1, что доказывает наличие нарушения сердечного ритма, а именно наличие бигеминии [3].

Для автоматизированной фиксации различий в спектрах ЭКС в норме и с приведенными выше аритмиями, мы предлагаем ввести коэффициент, представляющий собой отношение суммарных амплитуд высокочастотной части спектра к его низкочастотной части:

$$K = \frac{\sum_{i=0}^{f_{гр}} U_i}{\sum_{i=f_{гр}+1}^{500} U_i}. \quad (1)$$

Значения этого коэффициента существенным образом зависят от граничной частоты $f_{гр}$ между высокочастотной и низкочастотной частями спектра сигнала. Далее мы для каждого значения $f_{гр}$ от 5 Гц до 150 Гц с шагом 1 Гц вычисляли коэффициенты K для всех исследуемых ЭКС. Зависимость

K от $f_{гр}$ для двух классов представлены на рис. 3. Для каждой $f_{гр}$ получаются разные распределения K для случаев нормы и бигеминии. Нам необходимо найти оптимальное значение $f_{гр}$, при котором распределения K наиболее значимо различаются.

Для решения этой задачи построим гистограммы распределений коэффициента K при каждой $f_{гр}$ и аппроксимируем гистограммы гауссовскими плотностями распределения вероятностей (рис. 4). Используем суммарную вероятность принятия ошибочного решения p_{Σ} в качестве численного критерия различия распределений K для разных классов ЭКС.

$$p_{\Sigma} = p(S_0) \int_{K_{пор}}^{K_{пор}+3\sigma_0} w(K|S_0)dw + p(S_1) \int_{K_{пор}-3\sigma_1}^{K_{пор}} w(K|S_1)dw. \quad (2)$$

Здесь S_0 и S_1 – классы ЭКС в норме и ЭКС с бигеминией; $p(S_0)$ и $p(S_1)$ – доли количества случаев нормы и бигеминии соответственно в общем количестве исследованных случаев.

Мы полагаем оптимальным то значение граничной частоты $f_{гр}$, при котором p_{Σ} будет минимальным. Все построения мы провели с помощью программы Matlab, В результате получили оптимальную граничную частоту $f_{гр} = 20$ Гц. Гистограммы распределений коэффициента K для данного случая представлены на рис. 4.

Для распределений рис. 4 определим пороговое значение коэффициента K по критерию мак-

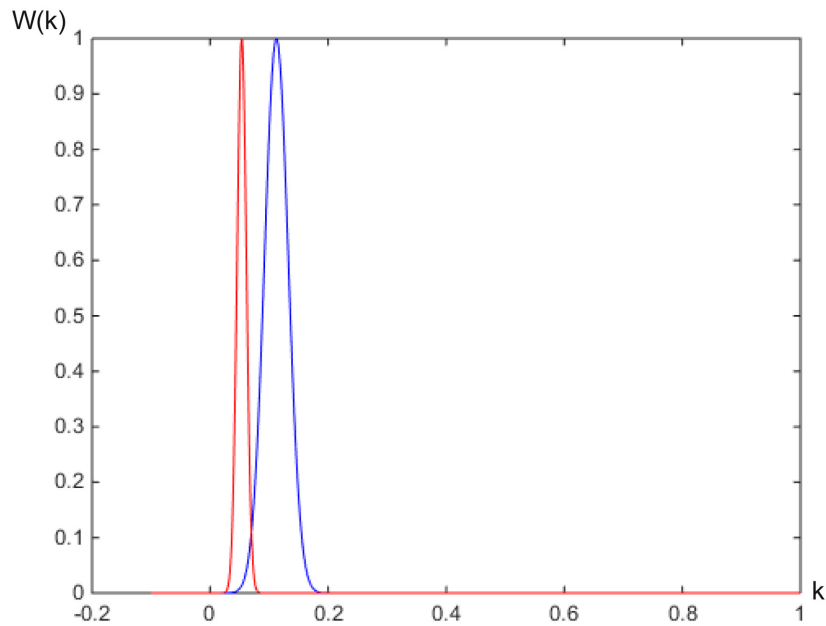


Рис. 4. Аппроксимация гистограмм распределений коэффициента K (справа норма, бигеминия слева)



Рис. 5. Исходный ЭКГ сигнал (тригеминия)

симального правдоподобия. Оно соответствует точке пересечения распределений с координатами $k_{\text{пор}} [0,07; 0,11084]$. Суммарная вероятность принятия ошибочного решения при этом составила: составила $p_{s0} = 0,00089396$; $p_{s1} = 0,00035393$; $p_{\text{общ}} = 0,00035393$.

Применим теперь точно такой же подход для определения тригеминии. Для анализа мы ис-

пользовали 40 реализаций ЭКС с наличием данной аритмии, взятых из базы данных ресурса PhysioNet [4]. Один из сходных ЭКГ сигналов с тригеминией приведен на рис. 5.

Аналогичный анализ определения порога принятия решения был проведен для сравнения ЭКС здорового человека и человека с тригеминией. Были получены графики отношения ВЧ/НЧ, представленные на рис. 6.

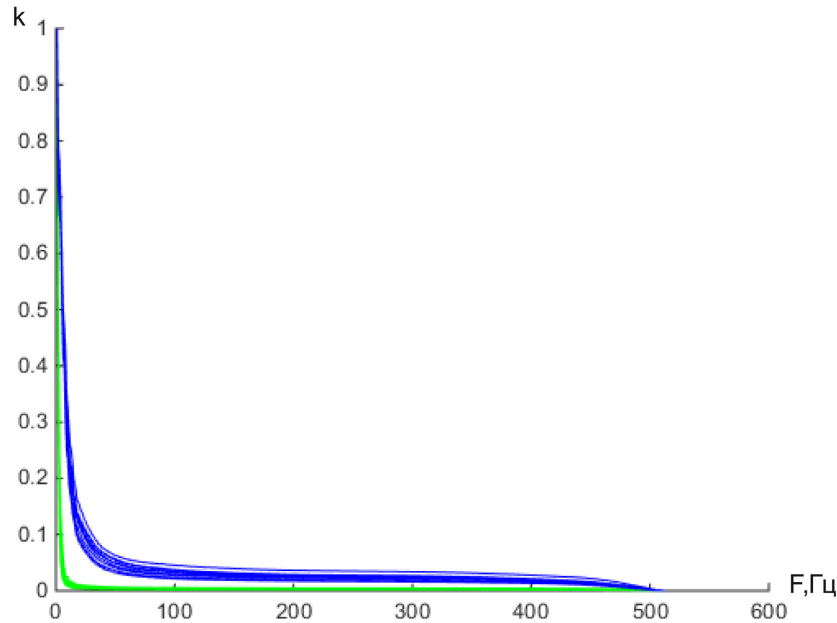


Рис. 6. Изменения коэффициента K от $f_{гр}$. Верхняя группа – норма; нижняя – тригеминия

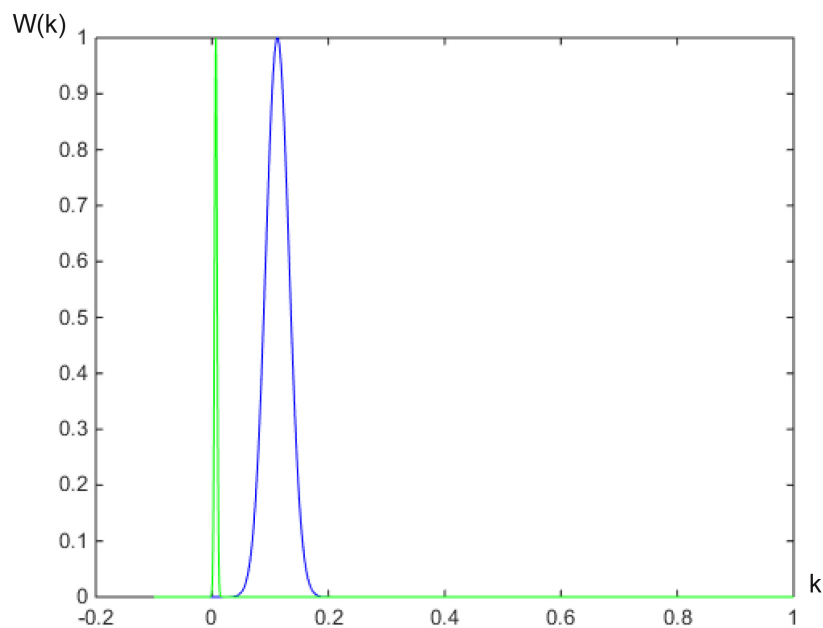


Рис. 7. Аппроксимация гистограмм распределений коэффициента K (справа – норма, слева – тригеминия)

Построим гистограммы распределений. Таким образом, мы эмпирически определили минимальную площадь под пересечением «кривых» и удалось достичь наилучшего различия групп сигналов при $f_{гр} = 25$ Гц. При этом точка пересечения распределений будет соответствовать точке с координатами $k_{пор} [0,0169; 0,00001334]$. Вероятность ошибки для распределений рис. 7 составила $p_{s0} = 0,0000078356$; $p_{s1} = 0,0000085495$; $p_{собщ} = 0,0000163851$.

Аналогичным образом определим порог принятия решения между нормой и пароксизмальной наджелудочковой тахикардией. Графики отноше-

ния высокочастотной части спектра к низкочастотной представлены на рис. 8.

Получим распределения плотностей вероятностей коэффициента K для двух классов S_0 норма и S_1 – пароксизмальная наджелудочковая тахикардия (рис. 9). Данный пример приведен также для случая минимальной суммарной вероятности принятия ошибочного решения при анализе ПНТ.

При этом $p_{s0} = 0,00005264$; $p_{s1} = 0,000087451$; $p_{собщ} = 0,00014009$. Точка пересечения распределений имеет координаты $k_{пор} [0,0403; 0,0016648]$. Суммарная вероятность ошибки для распределений рис. 10 при $f_{гр} = 23$ Гц является минималь-

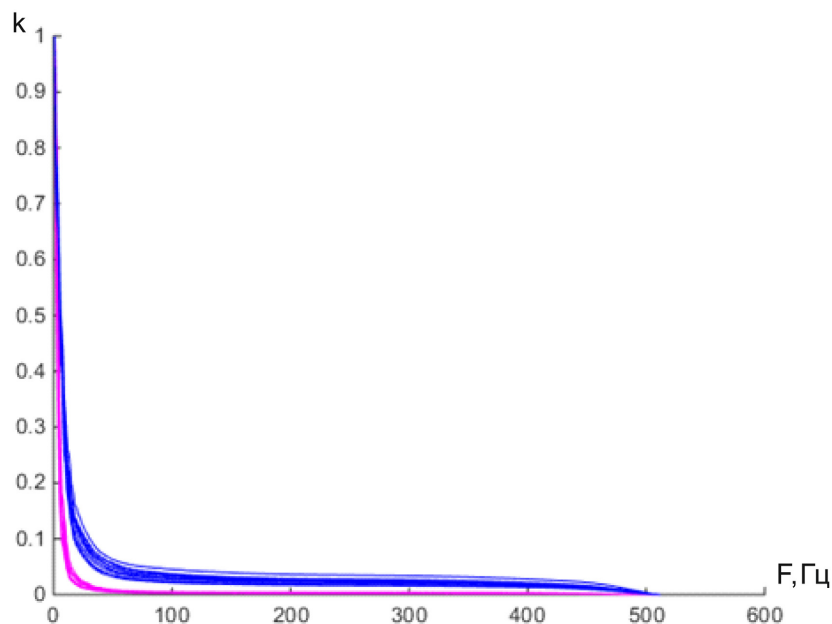


Рис. 8. Изменения коэффициента K от $f_{гр}$. Верхняя группа – норма; нижняя – ПНТ

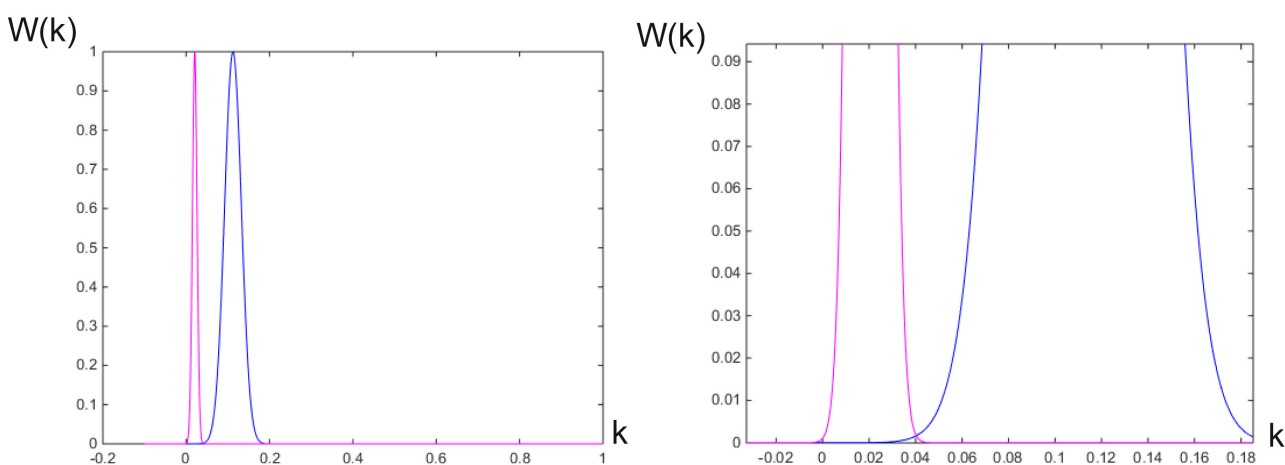


Рис. 9. Аппроксимация гистограмм распределений коэффициента K (справа – норма, слева – ПНТ)

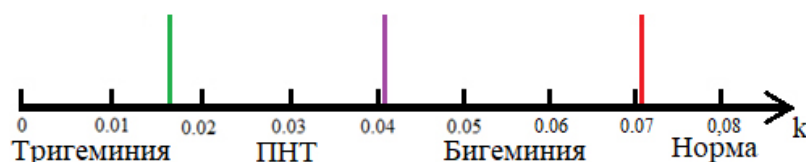


Рис. 10. Положение порогов принятия решения на одной числовой оси

ной. Поэтому соответствующее значение $k_{пор}$ считаем оптимальным для нашего исследования и принимаем его как исходное для дальнейших исследований данного вида аритмии.

Выделим диапазоны для точного принятия решения в пользу той или иной аритмии. Ранее было получено и показано, что в случае с бигеминией порог $k = 0,07$; в случае с тригеминией порог $k = 0,0169$; и в случае с пароксизмальной наджелудочковой тахикардией порог составлял $k = 0,0403$. Продemonстрируем это на одной числовой оси (рис. 10).

Все k , которые попадают в промежуток $0,0403 \div 0,007$ будут однозначно определять принадлежность отклонения сердечного ритма к бигеминии; коэффициенты k из промежутка $0,0169 \div 0,0403$ будут относиться к пароксизмальной наджелудочковой тахикардии; и, соответственно, коэффициенты, попавшие на отрезок $0 \div 0,0169$, будут определять принадлежность к тригеминии.

Ранее нами было проведено исследование использования амплитудного спектра ЭКС для построения графиков отношения ВЧ/НЧ и их ап-

Таблица

Сравнительная таблица полученных результатов

| Название аритмии | Амплитудно-частотный спектральный анализ | | Фазово-частотный спектральный анализ | |
|------------------|--|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | Вероятность ошибки, p_{Σ} | Коэффициент, k | Вероятность ошибки, p_{Σ} | Коэффициент, k |
| Норма-Бигеминия | $p_{\text{сообщ}} = 0,0025154$ | $k_{\text{пор}} [0,0698; 0,11688]$ | $p_{\text{сообщ}} = 0,00035393$ | $k_{\text{пор}} [0,07; 0,11084]$ |
| Норма-ПНТ | $p_{\text{сообщ}} = 0,002118$ | $k_{\text{пор}} [0,0362; 0,01794]$ | $p_{\text{сообщ}} = 0,00014009$ | $k_{\text{пор}} [0,0169; 0,00001334]$ |
| Норма-Тригеминия | $p_{\text{сообщ}} = 0,0018325$ | $k_{\text{пор}} [0,0342; 0,01617]$ | $p_{\text{сообщ}} = 0,0000163851$ | $k_{\text{пор}} [0,0403; 0,0016648]$ |

проксимации гистограммами распределений и результаты, полученные ранее, дали меньшую точность определения порога принятия решения.

В таблице приведены сравнительные результаты, полученные при амплитудно-частотном спектральном анализе и фазово-частотном.

Таким образом, в результате исследования были выявлены преимущества фазочастотных характеристик по сравнению с амплитудно-частотными характеристиками. А именно, повысилась точность принятия решения по причине уменьшения вероятности принятия ошибочного решения.

Список литературы

1. Heart Rate Variability / ed. by M. Malik, A.J. Camm. Hoboken: Wiley-Blackwell, 1995. 543 p.
2. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ: уч. пособ. для вузов / под ред. А.Л. Барановского и А.П. Немирко. М.: Радио и связь, 1993. 248 с.
3. PhysioNet / St.-Petersburg Institute of Cardiologigal Technics 12-lead Ahythmia Database. URL: <https://www.physionet.org/cgi-bin/atm/ATM>.
4. Кушаковский М.С., Гришкин Ю.Н. Аритмии сердца. СПб.: Фолиант, 2017. 720 с.

References

1. *Heart Rate Variability*. Ed. by M. Malik, A.J. Camm. Hoboken: Wiley-Blackwell, 1995, 543 p.
2. *Pulse. Equipment Of Continuous Ecg Monitoring: Account. Collec. For Schools*. Ed. by A.L. Baranovskogo, A.P. Nemirko. Moscow: Radio i svjaz', 1993, 248 p. [In Russian].
3. PhysioNet / St.-Petersburg Institute of Cardiologigal Technics 12-lead Ahythmia Database. URL: <https://www.physionet.org/cgi-bin/atm/ATM>.
4. Kushakovskij M.S., Grishkin Ju.N. *Cardiac Arrhythmia*. Saint-Petersburg: Foliant, 2017, 720 p. [In Russian].

UDC 615.471

DOI 10.18469/1810-3189.2019.22.4.192-199

Received: 08.11.2019

Accepted: 04.12.2019

Method of phase-frequency spectral analysis of electrocardiosignal in problems of home telemedicine

T.F. Scherbakova, S.S. Sedov, R.I. Yakupov

The article presents a method of phase-frequency spectral analysis of an electrocardiogram signal for use in portable arrhythmia detectors. The selection of spectrum values for differentiating between normal and abnormal QRS complexes of the electrocardiogram signal is describe. Sample spectra for various QRS complexes of real life signals are given. We developed an algorithm for detecting arrhythmias and further distinguishing them. The results that was obtained by spectral analysis should be used to prevent the development dangerous type of arrhythmias and their timely exposure detection.

Keywords: phase-frequency spectrum, amplitude-frequency spectrum, electrocardiogram, fast Fourier transform, arrhythmia, boundary frequency, decision threshold, probability of making a wrong decision, HF/LF ratio.

Щербакова Татьяна Филипповна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ.

Область научных интересов: компьютерная обработка и анализ электрокардиосигналов.

E-mail: rts@kai.ru

Седов Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ.

Область научных интересов: компьютерная обработка и анализ электрокардиосигналов.

E-mail: s.sedow@gmail.com

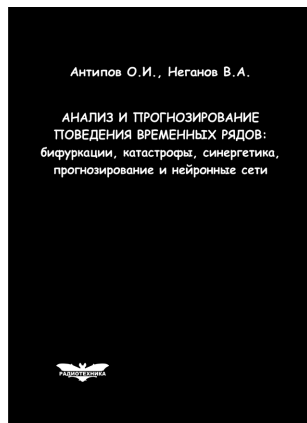
Якупов Раиль Ильшатович, студент направления подготовки 11.04.02 (магистратура), кафедры радиоэлектронных и телекоммуникационных систем Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева - КАИ.

Область научных интересов: компьютерная обработка и анализ электрокардиосигналов.

E-mail: rail1996@mail.ru

Антипов, О.И.

Анализ и прогнозирование поведения временных рядов: бифуркации, катастрофы, синергетика, фракталы и нейронные сети / О.И. Антипов, В.А. Неганов. – М.: Радиотехника, 2011. – 350 с.



ISBN 978-5-88070-294-7

УДК 530.1:621.372+621.396

ББК 32.96

Монография посвящена объединению нескольких направлений в науке: бифуркаций в нелинейных динамических (или детерминированных) системах, причем внимание уделяется бифуркациям-кризисам, которые отождествляются с катастрофами в синергетике – науке о самоорганизации в сложных системах, где велика роль коллективных, кооперативных эффектов, возникновения порядка – фрактальных структур в турбулентности (или хаосе). В синергетике общим является принцип подчинения, который позволяет исключать большое число переменных в сложных системах и описывать в них сложные процессы. Использование в роли одной из основных количественных характеристик катастроф фрактального показателя Херста связывает фракталы с бифуркациями. Объединение этих четырех направлений позволяет упростить проектирование прогнозирующих нейронных сетей, которое в настоящее время отчасти является искусством.

Даны авторские модификации некоторых известных фрактальных методов, позволяющие проводить более глубокий анализ хаотических процессов. Эти результаты, на наш взгляд, должны являться необходимой частью полного алгоритма построения прогностических моделей, описанного в книге. В частности, описан авторский алгоритм определения временного лага, необходимого для реконструкции аттрактора динамической системы, и модификация метода ближайших ложных соседей, которую можно использовать в качестве индикатора приближающейся катастрофы.

Приведены конкретные примеры из таких областей науки, как радиотехника, экономика и медицина.

Монография представляет интерес для научных работников, аспирантов и докторантов, работающих в области прикладных задач анализа, моделирования и прогнозирования хаотических процессов в нелинейных системах из различных отраслей науки и техники.