

А.И. Михалев, Р.А. Сухомлин

ОЦЕНИВАНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ РИТМ-СИГНАЛОВ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Статья посвящена оцениванию хаотических ритм-сигналов. В качестве примера динамической системы, на выходе которой наблюдаются хаотические ритм-сигналы, рассматривалась сердечно-сосудистая система человека. Проанализирована эффективность применения ряда методов оценивания хаотических ритм-сигналов для диагностирования сердечно-сосудистых заболеваний.

Ключевые слова: хаотический ритм-сигнал, динамическая система, сердечно-сосудистая система, диагностическая система

Введение. В промышленности широко используются технологические объекты управления роторного типа: турбо- и гидроагрегаты, вентиляционные установки, мощные электрические машины и т.п. При этом основным условием сокращения эксплуатационных затрат является перевод этих объектов на обслуживание и ремонт по фактическому состоянию, что требует периодического проведения процедуры технической диагностики.

В свою очередь, процессы в упомянутых объектах (вибрации, акустический шум) часто имеют ритмический характер (характер ритм-сигналов). Исследование закономерности ритмичности процессов может стать основой для разработки методов контроля параметров объектов рассматриваемого класса в аварийный и прежде всего в предаварийный периоды их работы. В то же время случайный, а зачастую хаотический характер анализируемых процессов затрудняет формирование признаков в пространстве исходных данных. Это обстоятельство вынуждает использовать специальные критерии анализа и методы обработки ритм-сигналов [1].

В свою очередь, необходимо отметить, что хаотические ритм-сигналы присущи не только техническим, но и прежде всего биосистемам [2]. В этой связи в данной работе в качестве динамической сис-

темы, обладающей ритм-сигналом, рассматривается сердечно-сосудистая система человека.

Приступая к оцениванию параметров нестационарных случайных сигналов, необходимо, прежде всего, проверить их на хаотичность по соответствующим критериям, к которым прежде всего относятся: нормированная энтропия [3], максимальный показатель Ляпунова [5], диаграммы Пуанкаре [4].

С другой стороны, существует класс методов собственно анализа variability ритм-сигнала. Данный класс методов широко применяется для анализа сердечного ритма. К ним прежде всего относятся методы построения: кардиоритмограмм, гистограмм распределения RR-интервалов, корреляционная ритмограмм. Они являются эффективным инструментом для определения степени влияния вегетативной нервной системы на сердечный ритм и для анализа его стабильности [6].

Целью данной работы является определение эффективности методов оценивания параметров хаотических ритм-сигналов на примере сердечно-сосудистой системы человека.

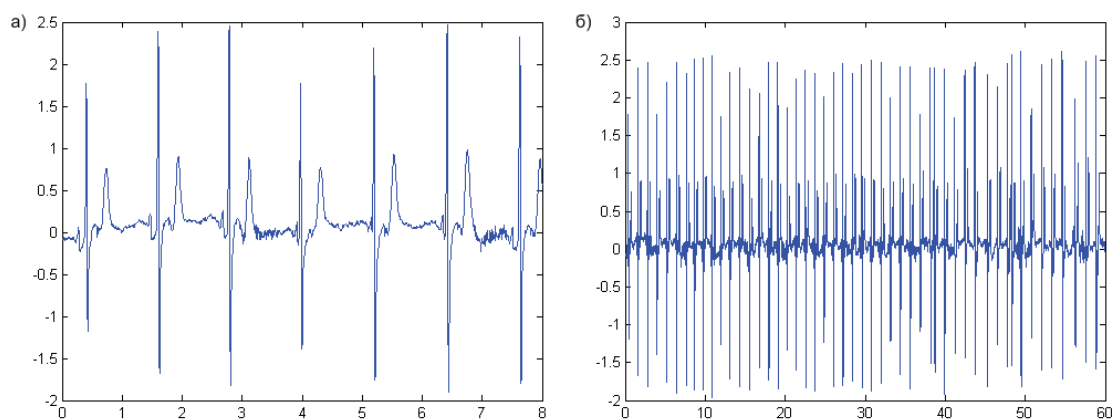
Оценивание хаотичности сигналов. Основным условием хаотичности системы является высокая чувствительность ее параметров к изменениям значений начальных условий. В качестве количественной меры чувствительности при этом используется экспонента Ляпунова.

Метод Вольфа самый распространенный метод вычисления максимального характеристического показателя Ляпунова. Он заключается в восстановлении фазового пространства и отслеживании эволюции восстановленных траекторий, которые расположены близко друг к другу. Отслеживается развитие множества первоначально ортогональных векторов (называемых векторами основной оси) относительно центральной траектории (называемой отправной траекторией). При этом скорость роста основного осевого вектора дает максимальный характеристический показатель Ляпунова λ_j :

$$\lambda_j \cong \frac{1}{\Delta t} \ln \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(t_0)} \quad (1)$$

Коэффициент Ляпунова электрокардиограммы, на которой изображена желудочковая тахикардия (рис. 1) равняется 0,0006. Известно, что, если данный показатель меньше нуля, то исследуемая

система стабильна и хаотичность отсутствует. В случае, когда показатель больше нуля – система переходит в режим хаотических пульсаций [5]. В данном случае значение коэффициента небольшое, и, значит, система работает достаточно стабильно и не переходит быстро в хаос.



а) запись ЭКГ в течении 6 секунд, б) запись ЭКГ в течении 60 секунд

Рисунок 1 – Электрокардиограмма желудочковой тахикардии

Нормированная энтропия электрокардиограммы желудочковой тахикардии (рис.1) равняется 12%, что свидетельствует о нестабильности сердечного ритма [3].

Диаграмма Пуанкаре для электрокардиограммы желудочковой тахикардии (рис.2) выглядит следующим образом:

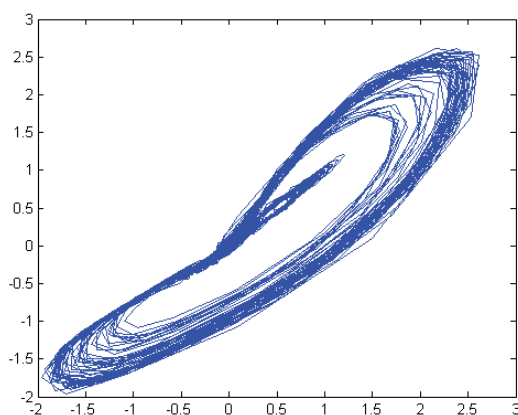


Рисунок 2 – Диаграмма Пуанкаре желудочковой тахикардии

Из диаграммы видно, что зубец Т сильно выражен, это привело к вытягиванию отростка посередине диаграммы. Достаточно толстые линии на диаграмме говорят о нестабильности сердечного ритма. Сильная разница между значениями зубца S и Q привели к тому, что диаграмма не симметрична оси, вдоль которой вытянута.

Анализ вариабельности ритм-сигналов. Далее рассмотрим один из методов анализа вариабельности ритм-сигналов. Гистограмма распределения RR-интервалов представляет из себя диаграмму, высота каждого столбика которой соответствует количеству RR-интервалов, попавших во временной диапазон, соответствующий положению рассматриваемого столбика на временной шкале. Для осмысления такого непростого определения, попробуем построить гистограмму на примере электрокардиограммы желудочковой тахикардии (рис.1).

Алгоритм построения гистограммы распределения RR-интервалов:

1. Находится максимальное (RRmax) и минимальное (RRmin) значения RR-интервалов за исследуемый период. Для нашего примера $R_{max} = 1,64$ с, а $R_{min} = 0,54$ с. Далее вычисляется значение размаха, т.е. разницы между максимальным и минимальным значением кардиоинтервалов $RR = 1,64 - 0,54 = 1,1$ с.

2. Вычисленное значение размаха делится на десять, получая тем самым шаг разбиения всего диапазона изменения RR на десять поддиапазонов. Отметим, что значение этого шага является, по существу, шириной каждого столбика гистограммы. Таким образом, легко видеть, что, как бы ни изменялись анализируемые ритмограммы, количество столбиков на гистограмме распределения будет всегда одним и тем же, зато их ширина может существенно меняться. Итак, шаг равен $\Delta RR/10 = 0,11$ с. Тогда получаем следующий набор поддиапазонов: 0,54-0,65 с, 0,65-0,76 с, 0,76-0,87 с, 0,87-0,98 с и так далее.

3. Для каждого из поддиапазонов определяется, какое количество RR-интервалов попадает в него. В результате получаем таблицу следующего вида:

Таблица 1 - Распределение RR-интервалов

Диапазон значений RR, сек.	Количество RR-интервалов, шт.
0,54-0,65	2
0,65-0,76	0
0,76-0,87	0
0,87-0,98	0
0,98-1,09	2
1,09-1,2	18
1,2-1,31	24
1,31-1,42	1
1,42-1,53	0
1,53-1,64	2

4. Графическая реализация полученных на предыдущем шаге табличных данных представляет собой гистограмму распределения RR-интервалов, полученную путем откладывания по горизонтальной оси времени в секундах, а по вертикальной – количество RR-интервалов (рис. 3).

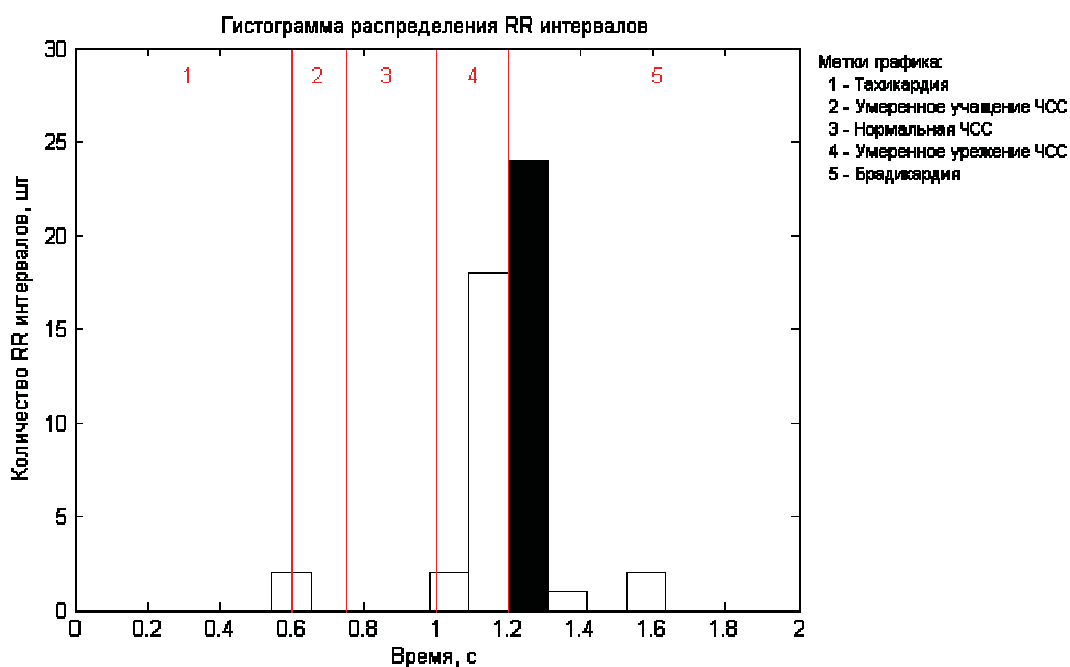


Рисунок 3– Схематичное изображение гистограммы распределения RR-интервалов

Залитый цветом прямоугольник гистограммы отражает наибольшее количество зарегистрированных нами кардиоинтервалов и имеет координату (в секундах), соответствующую положению этого столбика на горизонтальной оси. В нашем случае, это примерно 1,25 с. Эта величина является модой, т.е. наиболее вероятным значением RR-интервалов и обозначается M_o .

На основании значения моды можно сделать выводы о значении доминирующей частоты синусового ритма. ЧСС рассчитывается по формуле $ЧСС = 60 / M_o$. При этом следует иметь в виду, что величина рассчитанного таким образом ЧСС может отличаться от значения частоты синусового ритма, определенного на основании среднего значения частоты пульса, которая далеко не всегда характеризует наиболее часто встречающиеся кардиоциклы [6].

Анализируя ЧСС, придерживаются следующих пяти градаций:

- Урежение частоты синусового ритма сердца (брадикардия) при ЧСС < 50 уд/мин.
- Умеренное урежение синусового ритма сердца при ЧСС от 51 до 60 уд/мин.
- Нормальная частота синусового ритма сердца при ЧСС от 61 до 80 уд/мин.
- Умеренное учащение синусового ритма сердца при ЧСС от 81 до 100 уд/мин.
- Учащение синусового ритма сердца (тахикардия) при ЧСС > 100 уд/мин.

Таким образом, целесообразно ввести четыре реперные точки на горизонтальной координатной оси гистограммы, соответствующие указанным границам (50, 60, 80, 100 уд/мин) в секундах (соответственно, 1.2, 1.0, 0.75 и 0.6 с). Тогда, как правило, бывает достаточно схематичного изображения гистограммы (см. рис. 3) [6].

Отсюда, как видно из рис. 3, - при желудочковой тахикардии, как правило, происходит урежение частоты синусового ритма (брадикардия).

Для сравнения результатов спроведено оценивание ЭКГ здорового человека. Данному сигналу соответствует: значение коэффициента Ляпунова 0,0003, нормированная энтропия 58%, умеренное урежение синусового ритма. Достаточно тонкие линии на диаграмме Пуанкаре, построенной для данного сигнала, говорят о стабильности сердечного ритма (рис. 4).

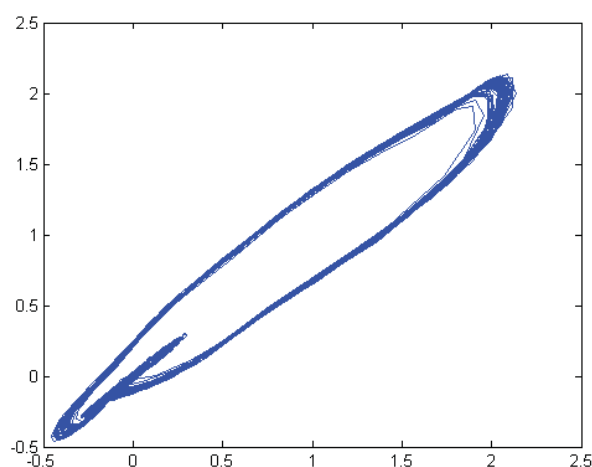


Рисунок 4 – Диаграмма Пуанкаре нормального синусового ритма

Выводы. В данной работе проведено исследование существующих методов анализа ритм-сигналов, которые используются для создания диагностической системы оценивания нормальности функционирования динамических систем.

Рассмотренному в работе случаю желудочковой тахикардии соответствует: значение коэффициента Ляпунова 0,0005, асимметричная диаграмма Пуанкаре, синусовая брадикардия, значение нормированной энтропии - 12% (при норме 50%-100%). В работе также приведены параметры нормального синусового ритма: нормированная энтропия 58%, коэффициент Ляпунова 0,0003, частота синусового ритма умеренно урежена. В результате сравнения этих двух сигналов можно сказать о значительном различии в значениях нормированной энтропии (в случае желудочковой тахикардии значительное отклонение от нормы), также различия заметны в диаграммах Пуанкаре (в случае желудочковой тахикардии данная диаграмма показывает высокую вариабельность сердечного ритма). Следует отметить то, что при желудочковой тахикардии проявляется синусовая брадикардия, а в случае нормального синусового ритма такого явления не наблюдается.

Результаты проведенного исследования показывают, что предлагаемый подход, основанный на вычислении вышеприведенных показателей ритм-сигналов, повышает точность принятого экспертом в процессе диагностики решения, а при проведении достаточного количества опытов, повысит эффективность диагностики в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михалев А.И., Гуда А.И., Деревянко А.И. Критерии идентификации параметров хаотической динамики управляемого объекта // Автомобильный транспорт. Вісник Харківського національного автодорожного університету. - Вып. 25, 2009. - С. 254-257.
2. Анищенко В.С. Знакомство с нелинейной динамикой: Лекции соросовского профессора. - М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. -144с.
3. Сапарин П.И. Нормированная энтропия как диагностический признак реакции сердечно-сосудистой системы человека на внешнее воздействие. Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1993. Т. 1, № 3-4.
4. Henon M. On the Numerical Computation of Poincare Maps // Physica D. 1982. V.5, №2,3.
5. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. - М.: Эдиториал УРСС, 2000. - 336 с.
6. Березный Е.А., Рубин А.М., Утехина Г.А. Практическая кардиоритмография. -спб.:Научно-производственное предприятие «Нео», 2005.-140 с.