

Анализ дополнительных показателей графа сердечного ритма.

Машин В.А.

Нововоронежский учебно-тренировочный центр подготовки специалистов для АЭС, г. Нововоронеж

Данное краткое сообщение содержит анализ дополнительных показателей графа сердечного ритма: сумма квадратов наименьших расстояний от узлов графа до оси X (SumX^2), сумма квадратов наименьших расстояний от узлов графа до оси Y (SumY^2), отношение $\text{SumX}^2/\text{SumY}^2$. Анализируется корреляция представленных показателей с показателями вариабельности сердечного ритма, связь $\text{SumX}^2/\text{SumY}^2$ с частотой гармонических колебаний и частотой пика с максимальной спектральной плотностью. Исследуются значения дополнительных показателей графа при различных функциональных состояниях и оценивается их возможность для диагностики стационарности процесса.

Analysis of additional indexes of heart rate graph.

Mashin V.A.

Novovoronezh Nuclear Power Station Personnel Training Center, Novovoronezh, Voronezh oblast, 396072, Russia

The additional indexes of heart rate graph (HRG) are presented: sum of squares of least distances from graph nodes before axis X (SumX^2), sum of squares of least distances from graph nodes before axis Y (SumY^2), relation $\text{SumX}^2/\text{SumY}^2$. The aims of this article are to (1) describe the new parameters of HRG, (2) analyze correlation of HRV indexes and new HRG parameters in rest state ($N=10036$), (3) analyze of relationship $\text{SumX}^2/\text{SumY}^2$ with frequency of harmonic fluctuations and frequency a pica with maximum spectral density, (4) analyze HRG new parameters for different functional states (1 – normal state, 2 - neurotic excitement, 3 - functional fatigue, 4 - psychic overstrain; on 32 men in group), (5) diagnostics the stationarity of process with help of new HRG indexes.

Исследуя структуру графа сердечного ритма [1], мы пришли к выводу о целесообразности рассмотрения следующих дополнительных показателей:

- SumX^2 - сумма квадратов наименьших расстояний от узлов графа до оси X (рис.1). (Напомним, что граф сердечного ритма вписан в квадрат со стороной равной вариационному размаху (BP): $\text{BP}=\text{RR}_{\text{max}}-\text{RR}_{\text{min}}$ (разность между максимальным и минимальным RR-интервалом). Ось X - диагональ квадрата, берущая свое начало в левом нижнем углу. Ось Y - диагональ, исходящая из правого нижнего угла.)
- SumY^2 - сумма квадратов наименьших расстояний от узлов графа до оси Y.

Квадрат наименьшего расстояния от узла графа до оси X рассчитывался по формуле: $X_i^2=0.5 \times (\text{RR}[i]-\text{RR}[i+1])^2$. Нетрудно заметить общность формул SumX^2 и RMSSD (Root Mean Sum Successful Deviation = $[\sum (\text{RR}[i]-\text{RR}[i+1])^2/(N-1)]^{0.5}$).

Для расчета Y_i^2 необходимо было учесть тот факт, что середина квадрата, в который вписывался граф, не всегда совпадала со средним значением RR-интервалов по выборке (RR_{cp}). Другими словами, были случаи, когда значение $\text{BP}/2$ было больше или меньше $\text{RR}_{\text{cp}}-\text{RR}_{\text{min}}$ (рис.1).

При этом "центр тяжести" графа смещался по оси X либо вверх, либо вниз от центра квадрата. С учетом коррекции по RR_{cp} формула для расчета квадрата наименьшего расстояния от узла графа до оси Y приобрела следующий вид: $Y_i^2 = 0.5 \times (RR[i] + RR[i+1] - 2 \times RR_{min} - 2 \times RR_{cp})^2$.

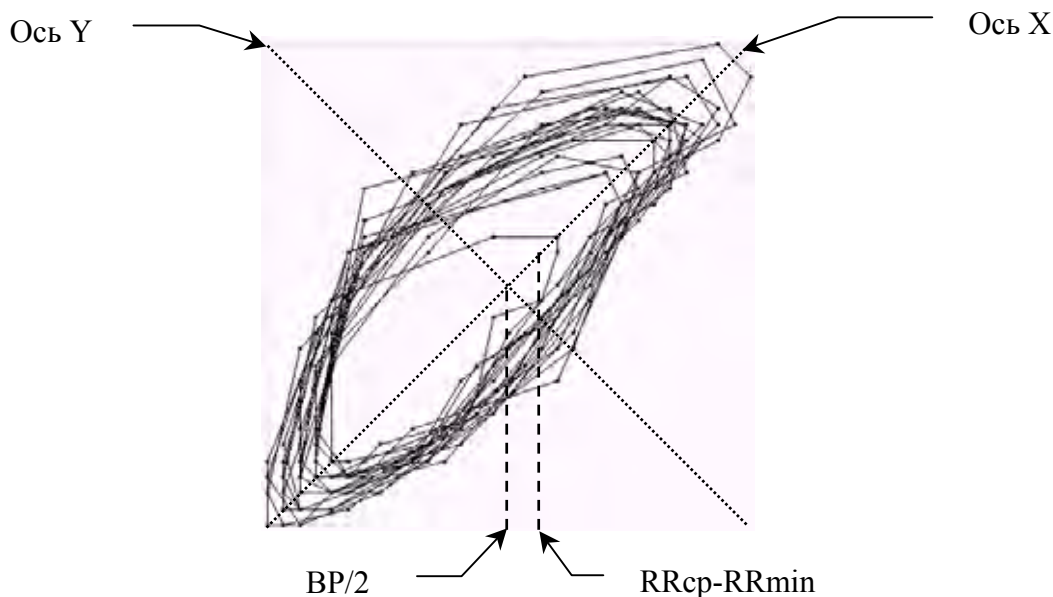


Рисунок 1. Граф сердечного ритма.

В таблице 1 представлены значения коэффициентов корреляции Пирсона (r) для ряда показателей variability сердечного ритма (HRV) и рассматриваемых показателей графа (регистрация RR-интервалов проводилась в состоянии покоя, функциональное состояние - норма; более полное описание процедуры обработки данных представлено в статьях [1, 2]).

	$\ln(RMSSD)$	HF	$\ln(SDNN)$	$\ln(PW)$
$\text{Sum}X^2$	0.5680	0.9662	0.4796	0.4823
$\ln(\text{Sum}X^2)$	0.9935	0.6494	0.8843	0.8869
$\ln(\text{Sum}Y^2)$	0.8287	0.4801	0.9890	0.9835

Таблица 1. Значения коэффициентов корреляции показателей HRV с показателями графа: $N = 10036$, уровень значимости $p = 0.000$, \ln - натуральный логарифм, HF-мощность спектра сердечного ритма в высокочастотном диапазоне, PW-общая мощность спектра, SDNN-стандартное отклонение.

Согласно таблице 1, сумма квадратов наименьших расстояний от узлов графа до оси X имеет очень высокую корреляцию с показателями тонуса парасимпатической нервной системы - RMSSD и HF (коэффициент корреляции между $\ln(RMSSD)$ и $\ln(HF)$ равен 0.9631). В тоже время, сумма квадратов наименьших расстояний от узлов графа до оси Y тесно связана с общей variability

сердечного ритма - SDNN и PW (коэффициент корреляции между $SDNN^2$ и PW равен 0.9938, а между $\ln(\text{Sum}Y^2)$ и $\ln[\ln(SDNN)] = 0.9920$).

Логично было ожидать высокую корреляцию отношения $\text{Sum}X^2/\text{Sum}Y^2$ с показателями HFn (HFn=100×HF/PW) и LF/HF (LF-мощность спектра сердечного ритма в низкочастотном диапазоне). Это подтвердил корреляционный анализ, результаты которого представлены в Таблице 2 ($P_{XY} = \text{Sum}X^2/\text{Sum}Y^2$).

	HFn	ln(HFn)	ln(LF/HF)
ln(P_{XY})	0.8560	0.8607	-0.7671

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции (r) показателей variability сердечного ритма с $\ln(P_{XY})$ (N=10036, уровень значимости p = 0.000).

На следующем шаге были рассчитаны значения показателя P_{XY} для гармонических колебаний с различной частотой по формуле: $x_t = R \times (\cos(2 \times \pi \times t \times f) + \sin(2 \times \pi \times t \times f)) + \mu$ (частота f изменялась в диапазоне от 0.01 до 0.50 Гц с шагом 0.01 Гц, амплитуда $R = 0.15$, среднее $\mu = 1.00$, длина моделируемого ряда составила 600 значений). Нелинейный регрессионный анализ позволил установить очень высокую связь между $\ln(P_{XY})$ и частотой гармонических колебаний, которая выражается полиномом третьей степени: $R = 0.99688$, $p = 0.0000$. Регрессионная модель объясняет 99.377% изменчивости $\ln(P_{XY})$.

Но в отличие от моделируемых гармонических колебаний, реальный сердечный ритм содержит множество осцилляций различной частоты и амплитуды, динамично изменяющихся во времени. Нами была выдвинута гипотеза: показатель P_{XY} отражает ведущую (центральную) частоту колебаний, имеющих наибольшее влияние на сердечный ритм. Для обоснования этой гипотезы были проанализированы спектрограммы сердечного ритма, определены частоты пиков с максимальной спектральной плотностью, которые затем сравнивались с P_{XY} . Коэффициент корреляции между P_{XY} и частотой пика с максимальной спектральной плотностью (f_{max}) хотя и оказался достаточно высоким ($r=0.7035$, $p=0.000$, $N=10036$), но потребовал дополнительного анализа связей между переменными. Это позволило выделить три гипотетических варианта отношений между P_{XY} и f_{max} :

1) Наблюдается очень высокое совпадение значений P_{XY} и f_{max} (например, $f_{max}=0.082$, $P_{XY}=0.080$). Это характерно для состояния активного покоя (готовность к выполнению деятельности). Можем предположить, что при этом высоко влияние вегетативной нервной системы (ВНС) на регуляцию сердечного ритма.

2) Рост P_{XY} значительно опережает рост f_{max} (например, $f_{max}=0.301$, $P_{XY}=1.082$). Данный процесс характерен для состояния глубокого расслабления. Это сопровождается снижением роли ВНС в

регуляции сердечного ритма, нарастанием хаотичности процесса. Значения P_{XY} стремятся к 1.0. Именно такие значения были получены нами при моделировании "белого шума".

3) Снижение f_{max} сопровождается ростом P_{XY} (например, $f_{max}=0.016$, $SD=3257 \text{ msec}^2$ (SD - спектральная плотность), $P_{XY}=0.328$, диагностировано хроническое перенапряжение, регистрация производилась в состоянии покоя). Данный процесс характерен для высокого психического напряжения и различных патологических процессов. Сеем предположить, что в этом случае нормальная регуляция сердечного ритма через ВНС становится невозможным, что также сопровождается ростом хаотичности процесса, но с очень низкой амплитудой (выраженная стабилизация ритма, на что указывает спектральная плотность).

Отдельно необходимо рассмотреть случай, когда спектрограмма содержит значимые пики в различных диапазонах частот. В этом случае показатель P_{XY} представляет собой результирующую частот двух колебаний. Например, при наличии пиков спектральной плотности с частотой 0.102 Гц (LF-диапазон, $SD=337420 \text{ msec}^2$) и 0.207 Гц (HF-диапазон, $SD=31345 \text{ msec}^2$), значение P_{XY} было равно 0.132 Гц. Заметим также, что показатель P_{XY} наиболее чувствителен к колебаниям в диапазонах LF и HF.

Далее для четырех групп обследуемых (32 мужчины в каждой группе) с различными функциональными состояниями (1 - норма, 2 - невротическое возбуждение, 3 - функциональное утомление, 4 - психическое напряжение) были рассчитаны средние значения анализируемых показателей графа по каждой группе (Таблице 3, значения SumX^2 и SumY^2 даны в msec^2).

	1	2	3	4
SumX^2	384142	104843	24956	3051
SumY^2	922894	1869820	106634	27051
P_{XY}	0.4178	0.0544	0.2562	0.1211

Таблица 3. Средние значения показателей графа сердечного ритма по каждой функциональной группе.

Как и ожидалось, максимальное значение SumX^2 (индикатора активности парасимпатической нервной системы) было получено для первой группы ("Норма"), и минимальное - для четвертой ("Напряжение"). Максимальное значение SumY^2 (показателя общей вариабельности сердечного ритма) характерно для состояния невротического возбуждения (влияние корково-лимбических систем [3], отметим значительное снижение P_{XY} - показателя ведущей (результирующей) частоты колебаний сердечного ритма). Значение P_{XY} для группы "Напряжение" отражает ранее рассмотренную нами динамику повышения P_{XY} при снижении f_{max} для случаев стабилизации ритма. Дополнительно был

рассчитан коэффициент Стьюдента для независимых выборок по каждой паре групп. Уровень значимости различий между средними для всех пар групп $p < 0.0000$. Заметим, что использование $\text{Sum}X^2$, $\text{Sum}Y^2$ и P_{XY} в дискриминантном анализе позволило существенно повысить точность дифференциальной диагностики представленных выше функциональных состояний на основе показателей графа сердечного ритма.

Дополнительно был проанализированы факты несовпадения середины квадрата, в который вписывается граф, со средним значением RR-интервалов (рис.1): середина вариационного размаха может отличаться от $RR_{cp} - RR_{min}$. В этом случае возможны три варианта:

- 1) $BP/2 - (RR_{cp} - RR_{min}) > 0$. Анализ ритмограмм показал, что это характерно для переходного процесса: плавная (долговременная) смена одного функционального состояния другим, устойчивое эмоциональное возбуждение.
- 2) $BP/2 - (RR_{cp} - RR_{min}) < 0$ - характерно для нарушения регуляции сердечного ритма: резкая (кратковременная) смена одного функционального состояния другим, резкая волна эмоционального возбуждения.
- 3) $BP/2 - (RR_{cp} - RR_{min}) = 0$ - характерно для стационарного процесса.

Для обоснования гипотезы о связи разности между $BP/2$ и $(RR_{cp} - RR_{min})$ со стационарностью процесса мы сравнили результаты, полученные на основании этой разности, с оценками стационарности временного ряда, полученные с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена (через проверку постоянства во времени математического ожидания и дисперсии [4]). Разность между BP и $(RR_{cp} - RR_{min})$ мы выразили в процентах от $(RR_{cp} - RR_{min})$: $D_{vm} = 100 \times (BP/2 - (RR_{cp} - RR_{min})) / (RR_{cp} - RR_{min})$. Для оценки значимости отношений между двумя категориальными переменными по критерию Pearson χ^2 (чем выше значения критерия, тем выше корреляция между переменными) мы воспользовались данными регистрации RR-интервалов в состоянии покоя ($N=10036$). Была рассчитана стационарность по D_{vm} для трех случаев, когда разность не превышала 1, 2 и 3 процентов (Таблица 4).

D_{vm}	1%	2%	3%
Pearson χ^2	2.1558	8.9356	11.0789
p	0.14204	0.00280	0.00087

Таблица 4. Значения критерия Pearson χ^2 (p – уровень значимости) для оценок стационарности процесса с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена и различных уровней D_{vm} .

Согласно результатам, представленным в таблице 4, показатель D_{vm} действительно может служить оценкой стационарности временного ряда. Анализ реальных ритмограмм показал, что выбор $D_{vm}=1\%$ приводит к более точной диагностике стационарности, чем в случае оценки постоянства во времени математического ожидания и дисперсии временного ряда. Безусловно, последующие исследования должны подтвердить или опровергнуть представленные в данном кратком сообщении гипотезы.

Литература.

1. Машин В.А. Анализ variability сердечного ритма с помощью метода графа. // Физиология человека, 2002, том 28, № 4, с. 70-80.
2. Машин В.А. Зависимость показателей variability сердечного ритма от средней величины RR-интервалов. // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова, 2002, 88, № 7, с. 851-855.
3. Машин В.А., Машина М.Н. Анализ variability ритма сердца при негативных функциональных состояниях в ходе сеансов психологической релаксации. // Физиология человека, 2000, том 26, №4, с. 48-54.
4. Кенделл М.Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. - М.: Наука, 1976. - 736 с.