

## 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 ( $\text{SumX}^2$ ), сумма квадратов наименьших расстояний от узлов графа до оси Y ( $\text{SumY}^2$ ), 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 ( $\text{SumX}^2$ ), sum of squares of least distances from graph nodes before axis Y ( $\text{SumY}^2$ ), 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.

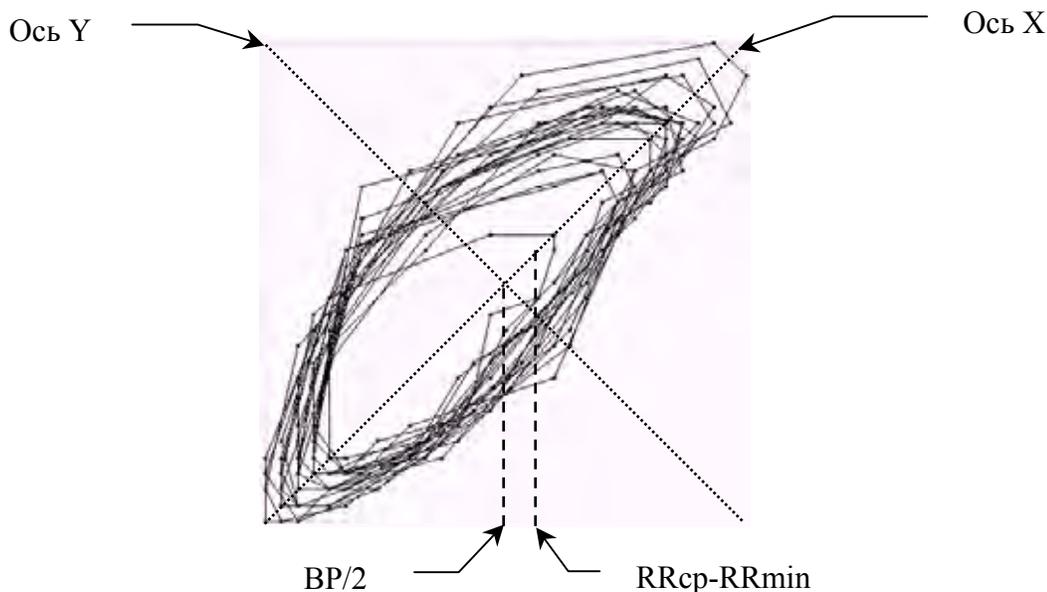
Исследуя структуру графа сердечного ритма [1], мы пришли к выводу о целесообразности рассмотрения следующих дополнительных показателей:

- $\text{SumX}^2$  - 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.)
- $\text{SumY}^2$  - 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  $\text{SumX}^2$  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 ( $\text{RR}_{\text{cp}}$ ). 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 ( $P_{XY} = \text{Sum}X^2/\text{Sum}Y^2$ ).

	<b>HFn</b>	<b>ln(HFn)</b>	<b>ln(LF/HF)</b>
<b>ln(P<sub>XY</sub>)</b>	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  $\text{msec}^2$ ).

	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  $\chi^2$  (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).

<b>D<sub>vm</sub></b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>
<b>Pearson <math>\chi^2</math></b>	2.1558	8.9356	11.0789
<b>p</b>	0.14204	0.00280	0.00087

**Таблица 4.** Значения критерия Pearson  $\chi^2$  ( $p$  – 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.