

## АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОШИБКИ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ТАХОГРАММЫ

### Введение

Наиболее информативным неинвазивным методом количественной оценки вегетативной регуляции сердечного ритма признано определение variability сердечного ритма (ВСР). Многие зарубежные исследователи [1 – 7] изучают влияние используемых методов предварительной обработки тахограммы (передискретизации) на ее спектральную оценку. Но на данный момент не изучен вопрос влияния интервала передискретизации  $\Omega\delta$  и ошибки интерполяции  $\delta$  на ряд показателей, которые используются при анализе спектра и учитываются далее при расчете интегральных характеристик ВСР.

В статье приведен алгоритм расчета ошибки интерполяции  $\delta$ .

### Постановка задачи

Анализ variability сердечного ритма начинается с формирования исходных данных из кардиосигнала путем выделения R-зубцов и расстояния между ними, называемые RR-интервалами. Такая последовательность RR-интервалов (или отсчетов) формирует тахограмму, где по оси абсцисс откладываются номера RR-интервалов, а по оси ординат – их длительность (рис.1).

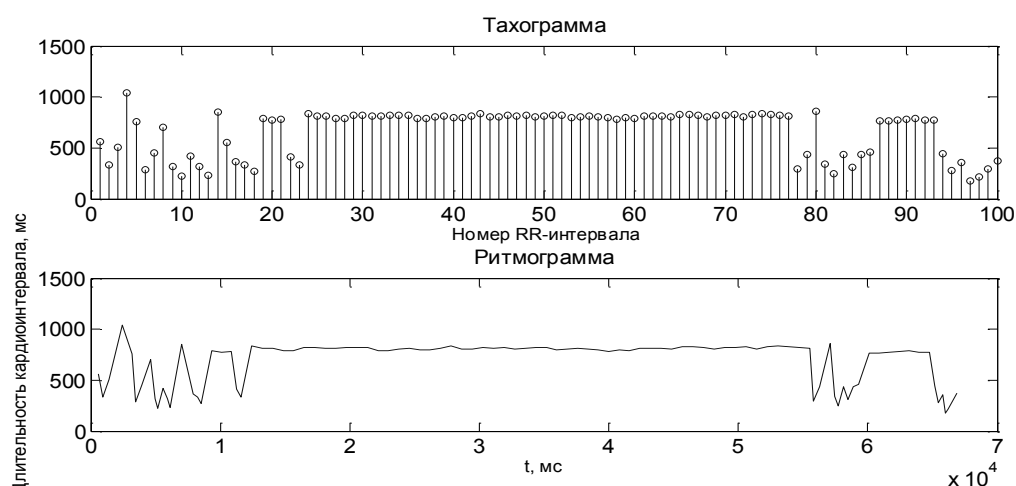


Рис.1. Тахограмма и ритмограмма, сформированная на ее основе

Чтобы проанализировать тахограмму при помощи спектральных методов, необходимо выполнить ее предварительную обработку, а именно: представить сигнал как функцию времени (рис.1). Его называют RR-ритмограммой и он имеет неодинаковые интервалы между соседними отсчетами. Однако для корректного выполнения спектрального анализа необходимо использовать равномерно распределенный сигнал во времени, а следовательно, RR-ритмограмма требует дальнейшего преобразования путем передискретизации [2, 4, 7]. При передискретизации необходимо интерполировать амплитуду RR-ритмограммы, которую можно выполнить по методу ближайших соседей (NNR), кусочно-линейной функцией, кубическими сплайнами (Spline) или кусочными полиномами Эрмита (PCH).

После передискретизации сигнал искажается на величину ошибки интерполяции, которая отличается при разных интервалах передискретизации. А для получения наиболее правдоподобных результатов анализа ВСР необходимо учитывать эту величину и минимизировать ее влияние.

Спектральная оценка тахограммы изучается многими исследователями [1 – 7]. Разработаны новые методы получения спектра сигнала [8]. Но на данный момент наиболее распространенным методом спектрального анализа ВСП является преобразование Фурье, которое требует использовать передискретизированный сигнал. Поэтому важно исследовать влияние ошибки интерполяции, возникающей после передискретизации. В литературе работы на эту тему отсутствуют.

### Алгоритм передискретизации ритмограммы кусочно-линейной функцией

Процесс формирования тахограммы и ритмограммы обуславливает ее кусочно-линейный характер. Поэтому нами выбран именно данный тип интерполяции. Процесс передискретизации ритмограммы путем линейной интерполяции кусочно-линейной функцией начинается с ввода массива данных, состоящего из последовательности длительностей

$RR$ -интервалов в миллисекундах [9] и значения интервала передискретизации  $\Omega\delta$  (рис.2) [10].

Входной массив данных необходимо преобразовать в сигнал с временной шкалой. Для этого от нулевой отметки оси абсцисс откладывается момент времени  $T_1$ , равный первому  $RR$ -интервалу и  $t_0$  передискретизированного массива. В связи с последним предложением, первый цикл для переменных  $T$  и  $RR$  начинается со второго элемента, а последующие циклы продолжаются по всей длине входного сигнала. Эти переменные соответствуют моментам времени и амплитудам отсчетов преобразованного сигнала (рис.6). Таким образом, последовательность  $RR$ -интервалов выступает в роли «амплитуд сигнала», и по временной шкале эти «амплитуды» располагаются друг относительно друга на расстоянии последовательных  $RR$ -интервалов.

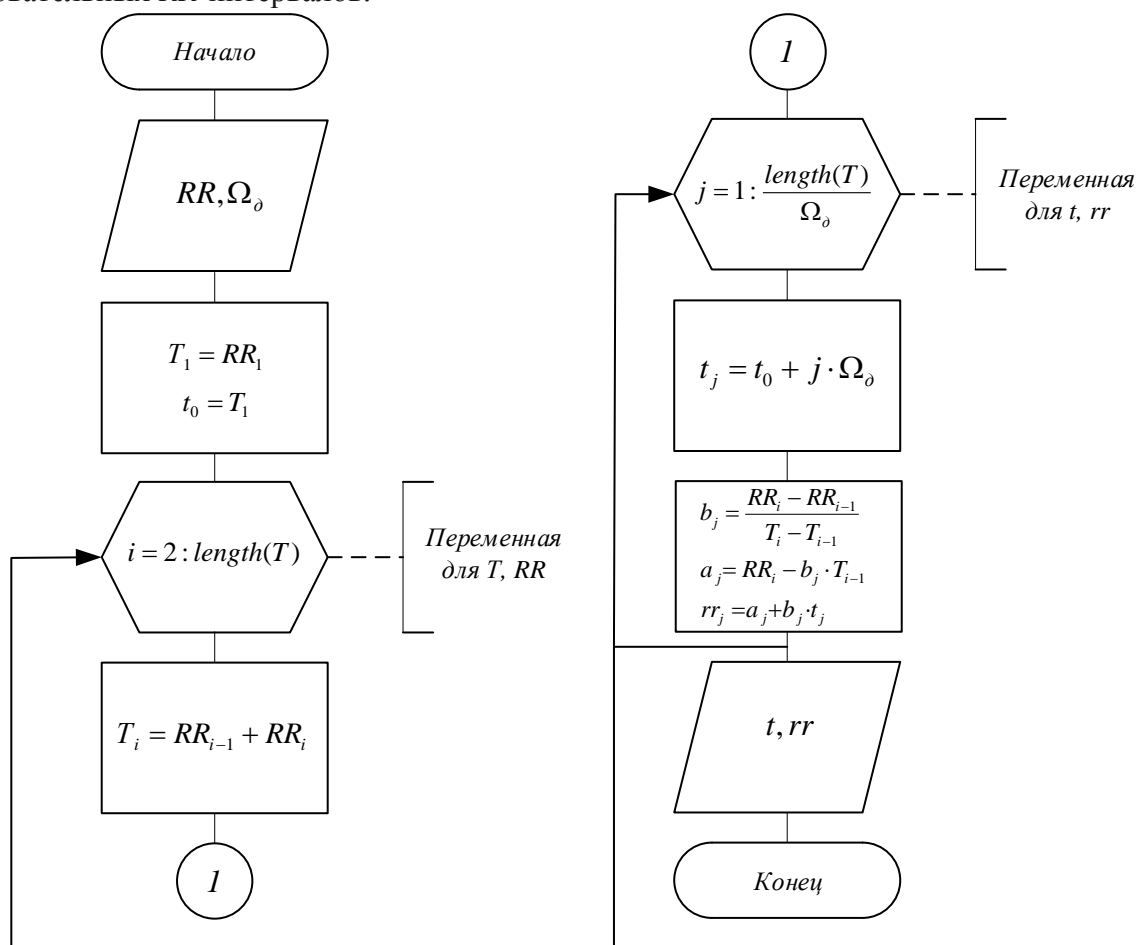


Рис. 2. Алгоритм передискретизации ритмограммы

Вычисление момента времени отсчета  $t$  и его амплитуды  $rr$  нового массива выполняется в цикле с шагом передискретизации  $\Omega\delta$ . Амплитуда каждого отсчета, находящегося между соседними исходными  $RR$ -интервалами, вычисляется согласно линейной зависимости  $rr_j = a_j + b_j \cdot t_j$ , где  $a_j = RR_i - b_j \cdot T_{i-1}$ ,  $b_j = \frac{RR_i - RR_{i-1}}{T_i - T_{i-1}}$ . Линейная зависимость меняется для каждой пары соседних  $RR$ -интервалов исходной последовательности.

### Алгоритм вычисления ошибки интерполяции

Передискретизация тахограммы вызывает искажение формы сигнала, степень которого зависит от интервала передискретизации  $\Omega\delta$ . Наиболее характерные  $RR$ -ритмограммы после передискретизации с разными интервалами представлены на рис.3 – 5 (под каждым исходным сигналом снизу приведен передискретизированный). Так, на рис. 2 выделены области, которые не показывают видимых изменений в форме сигнала. Однако при более детальном рассмотрении этих областей становится заметной существенная разница в амплитуде, что подтверждается большим значением ошибки передискретизации (при  $\Omega\delta = RR_{min}/10$ ).

Наиболее заметная разница между исходной тахограммой и передискретизированной (при  $\Omega\delta = 500$  мс) представлена на рис. 3 и свидетельствует о сильном искажении формы сигнала при его преобразовании.

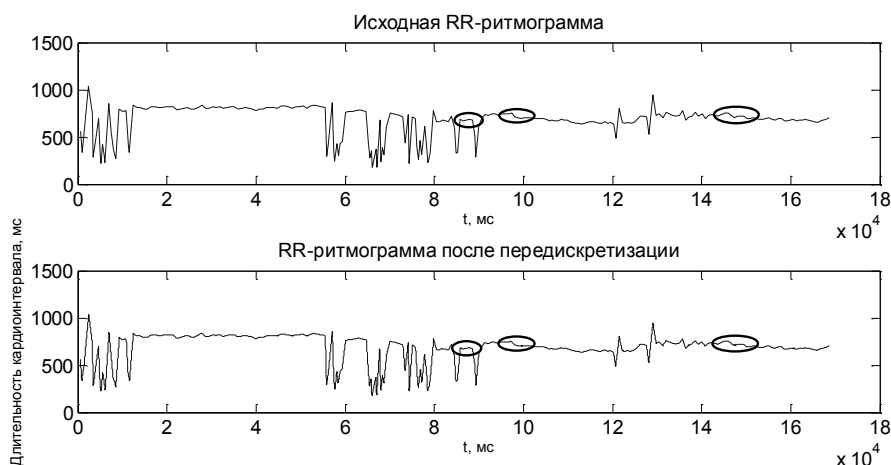


Рис.3.  $RR$ -ритмограммы (исходная и передискретизированная) с  $\Omega\delta = RR_{min}/10$

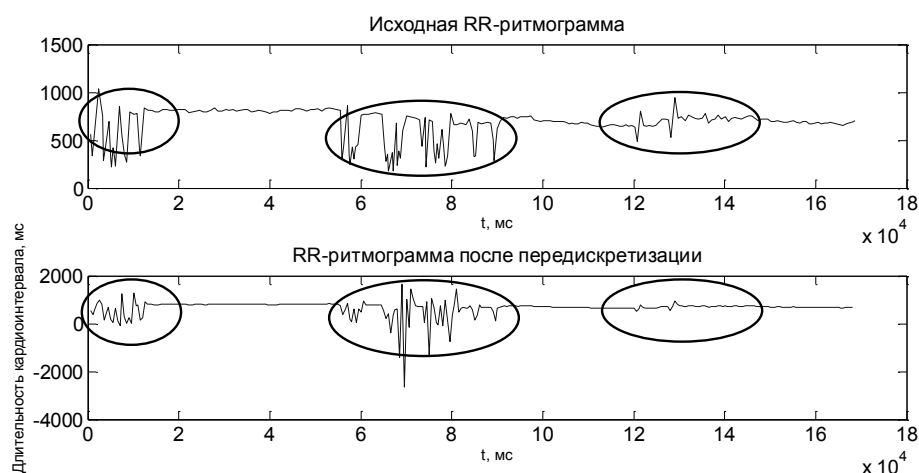


Рис. 4.  $RR$ -ритмограммы (исходная и передискретизированная) с  $\Omega\delta = 500$  мс

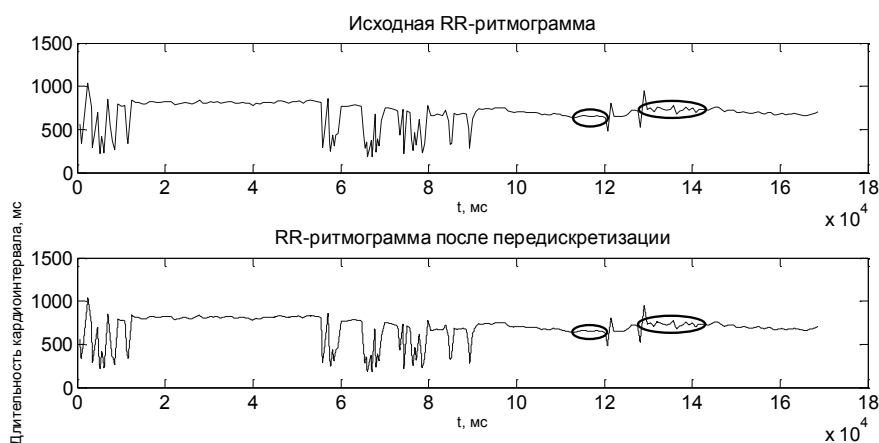


Рис. 5. RR-ритмограммы (исходная и передискретизированная) с  $\Omega\delta=1/(170 \text{ Гц})$

Так как при сравнении исходных и передискретизированных  $RR$ -тахограмм наблюдается разница по форме и амплитуде, необходимо провести количественную оценку результатов передискретизации, а именно – рассчитать суммарную ошибку интерполяции  $\delta = \sum \delta_i$ . На рис.6 показано, что ошибка интерполяции  $\delta_i$  в упрощенном виде вычисляется как разница между фактической амплитудой отсчета (сплошная линия  $RR$ ) и его интерполированным значением (обозначено " $RR_{\delta}$ "):

$$\delta_i = RR_i - RR_{\delta_i} \quad (1)$$

Передискретизированный фрагмент  $RR$ -ритмограммы изображен пунктирной линией.

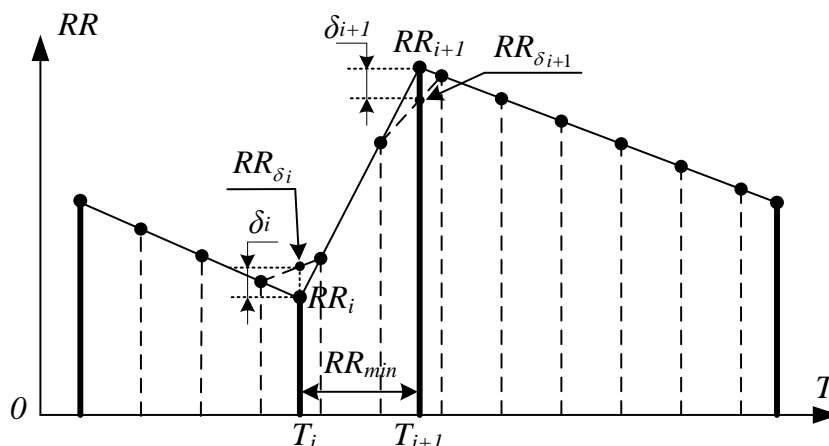


Рис. 6. Невязка при кусочно-линейной интерполяции

Алгоритм расчета абсолютной ошибки интерполяции приведен на рис.7. Для удобства мы ввели четыре переменные:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ .

Алгоритм начинается с ввода массива данных, состоящего из амплитуды  $RR$ -интервалов и их последовательных моментов времени, в которые они появляются. Цикл начинается со второго элемента, так как первому элементу  $t_0$  нового массива присваивается первое значение исходного массива  $T_1$ . Для каждой пары временного ряда  $[T_{i-1}; T_i]$  рассчитывается количество новых отсчетов  $n$  между ними, чтобы найти последний новый отсчет  $t_n$ , находящийся перед элементом массива  $T_i$  (рис.7). Оно рассчитывается по формуле

$$n = \frac{T_i - T_{i-1}}{\Omega\delta}, \quad \text{где}$$

$\Omega\delta$  – интервал передискретизации.

Чтобы найти ошибку  $\delta_i$ , необходимо установить, между какими отсчетами расположен основной  $RR$ -интервал  $T_i$  по формулам  $t_n = t_0 + n \cdot \Omega \delta$ ,  $t_{n+1} = t_n + \Omega \delta$  (рис.8). Далее находим отсчеты в моменты времени  $t_n, t_{n+1}$ , находящиеся возле  $T_i$ . Их амплитуды вычисляем из уравнения линейной зависимости  $rr_n = b_n t + a_n$ , где  $b_n = tg(T_i - T_{i-1}) / (t_n - t_{n-1})$ ,  $a_n = y_n - kt_n$ . Линейная зависимость меняется для каждого участка между исходными кардиоинтервалами. С помощью полученной зависимости вычисляется значение кардиоинтервала в момент времени  $t_n$ . Далее вычисляется значение следующего элемента массива  $t_{n+1}$ .

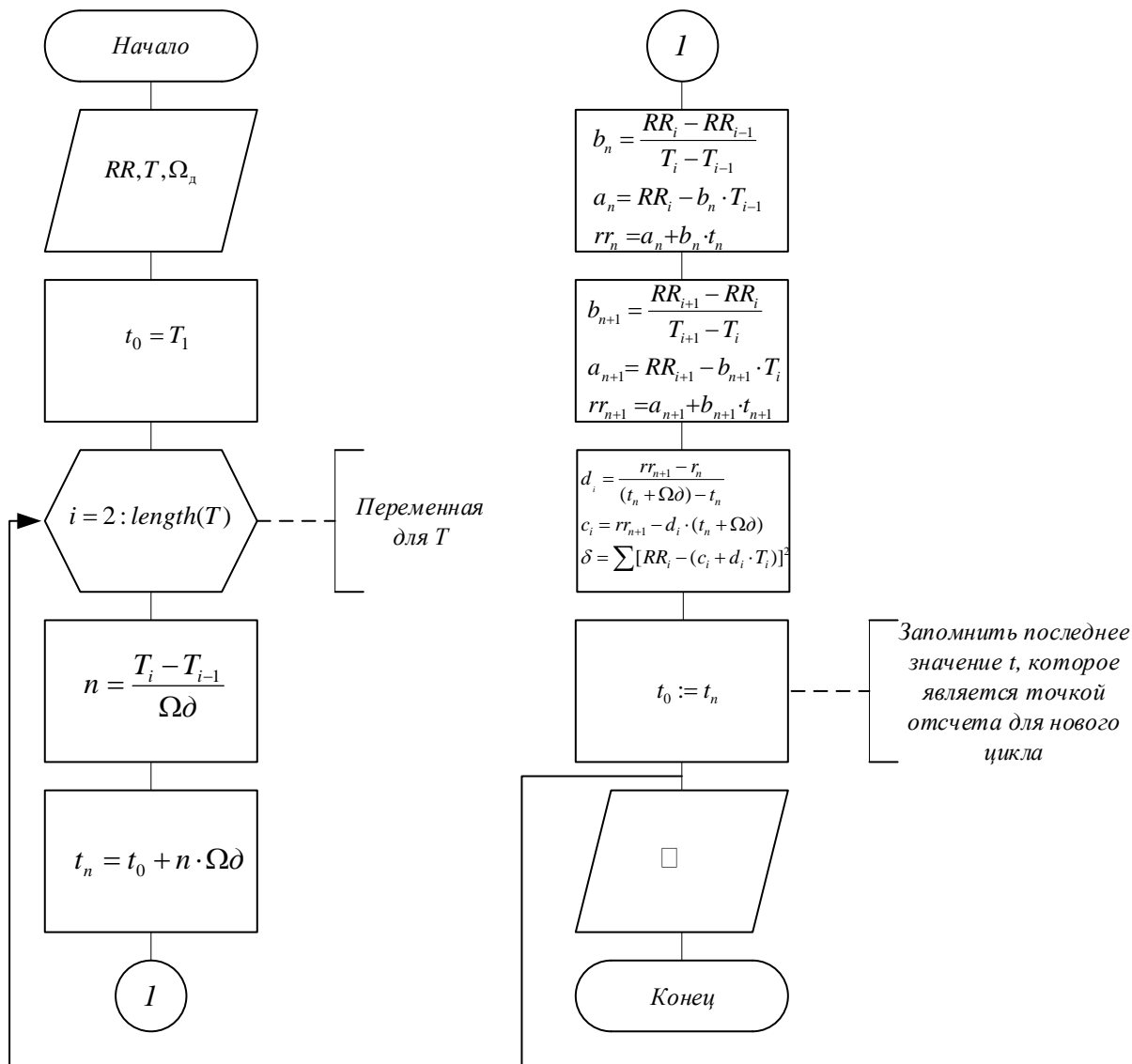


Рис. 7. Алгоритм вычисления ошибки интерполяции

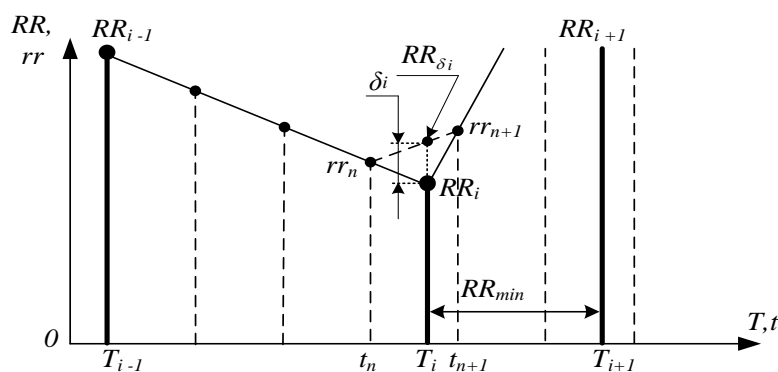


Рис. 8. Принцип вычисления ошибки интерполяции тахограммы  $\delta_i$

При помощи этих вычислений находим ошибку интерполяции  $\delta_i$  как разность между амплитудой исходного кардиоинтервала  $RR$  и  $RR_{\delta}$ , вычисленного по функции в момент времени  $T_i$  (рис. 8). Амплитуда  $\delta_i$  вычисляется подобно расчету амплитуд новых отсчетов –

при помощи уравнений линейных зависимостей  $\delta_i = RR_i - (c_i + d_i \cdot T_i)$ , где  $d_i = \frac{rr_{n+1} - r_n}{t_{n+1} - t_n}$ ,

$$c_i = rr_{n+1} - d_i \cdot t_{n+1}.$$

Момент времени  $t_n$ , соответствующий текущей ошибке, присваиваем переменной  $t_0$ , т.к. поиск точек, в которых рассчитывается ошибка передискретизации, выполняется для каждого элемента массива  $T$ .

Конечная формула вычисления ошибки интерполяции тахограммы имеет вид

$$\delta = \sum [RR_i - (c_i + d_i \cdot T_i)]^2, \text{ где } d_i = \frac{rr_{n+1} - r_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (2)$$

$$c_i = rr_{n+1} - d_i \cdot t_{n+1}$$

При помощи данного алгоритма было проанализировано 45 сигналов с 20 интервалами передискретизации и получена зависимость усредненной для всех сигналов относительной ошибки интерполяции  $\delta_i$  от интервала передискретизации  $\Omega\delta$  (рис.9), которая имеет прямо пропорциональную убывающую тенденцию. Интервалы передискретизации выбирались по отношению к минимальному  $RR$ -интервалу (обозначается как  $RR_{min}$ ) тахограммы. Представленная зависимость наглядно показывает, что чем меньше интервал передискретизации, тем меньше ошибка интерполяции тахограммы и тем меньше искажения исходного сигнала. Это позволяет провести более достоверный анализ.

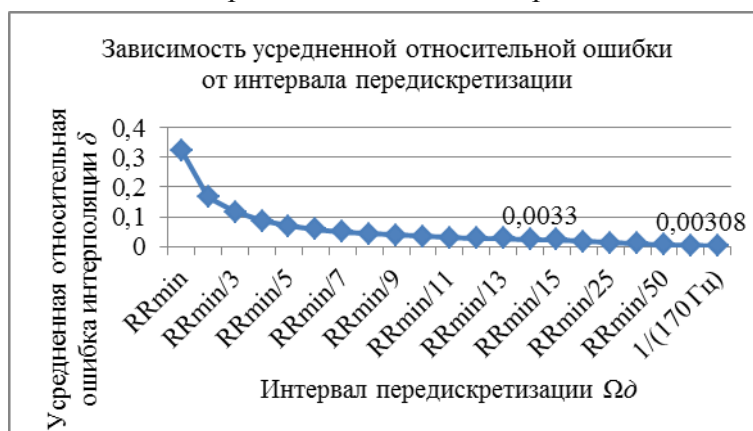


Рис. 9. Зависимость усредненной для всех сигналов относительной ошибки интерполяции  $\delta_i$  от интервала передискретизации  $\Omega\delta$

Таким образом, при помощи предложенного алгоритма расчета ошибки интерполяции  $\delta_i$  можно определить степень влияния передискретизации на исходный сигнал и выбрать подходящий интервал передискретизации  $\Omega\delta$ , а именно  $\Omega\delta = 1/(170 \text{ Гц})$ , рекомендованный в [10], так как ошибка, возникающая после интерполяции с данным  $\Omega\delta$ , имеет наименьшее значение. Как видно из графика, усредненная относительная ошибка интерполяции  $\delta_i$  для всех 45 сигналов при интервале передискретизации  $\Omega\delta = RR_{\min}/100$  равна 0,0033, а при  $\Omega\delta = 1/(170 \text{ Гц}) \delta_i = 0,00308$ .

### Выводы

Предложены алгоритмы передискретизации и расчета ошибки интерполяции  $\delta_i$  тахограммы, которые позволяют провести передискретизацию с минимальными искажениями исходного сигнала.

В результате анализа 45 сигналов с 20 интервалами передискретизации выявлена сильная корреляция интервала передискретизации тахограммы  $\Omega\delta$  и ошибки ее интерполяции  $\delta_i$  в виде прямо пропорциональной зависимости. Это позволяет минимизировать искажения сигнала за счет подбора корректного  $\Omega\delta$ , равного  $1/(170 \text{ Гц})$  для получения наиболее достоверного результата обработки тахограммы.

**Список литературы:** 1. *Kim, KoKeun*. The effect of missing RR-interval data on heart rate variability analysis in the frequency domain / Ko Keun Kim, Jung Soo Kim, Yong Gyu Lim, Kwang Suk Park // IOP Publishing physiological measurement. – 2009. – №30. – P. 1039–1050. 2. *Singh, D*. Sampling frequency of the RR interval time series for spectral analysis of heart rate variability / D. Singh, K. Vinod, S. C. Saxena // Journal of Medical Engineering & Technology. – 2004. – Volume 28, Number 6. – P. 263–272. 3. *Moody, George B*. Spectral Analysis of Heart Rate Without Resampling / George B. Moody // Harvard-M.I.T. Division of Health Sciences and Technology, Cambridge. – 1993. – P. 715–718. 4. *Clifford, Gari D*. Quantifying Errors in Spectral Estimates of HRV Due to Beat Replacement and Resampling / Clifford, Gari D., Lionel Tarassenko // IEEE Transactions on biomedical engineering. – 2005. – Vol. 52, No. 4. – P. 630–638. 5. *Laguna, Pablo*. Power Spectral Density of Unevenly Sampled Data by Least-Square Analysis: Performance and Application to Heart Rate Signals / Pablo Laguna, George B. Moody, Roger G. Mark // IEEE Transactions on biomedical engineering. – 2005. – Vol. 45, No. 6. – P. 698–715. 6. *Kim, Ko Keun*. The effect of missing RR-interval data on heart rate variability analysis in the frequency domain / Ko Keun Kim, Jung Soo Kim, Yong Gyu Lim, Kwang Suk Park // IOP Publishing physiological measurement Physiol. Meas. – 2009. – №30. – P. 1039–1050. 7. *Singh, D*. Sampling frequency of the RR interval time series for spectral analysis of heart rate variability. / D. Singh, K. Vinod, S. C. Saxena // Journal of Medical Engineering & Technology. – 2004. – Volume 28, Number 6. – P. 263–272. 8. *Moody, G.B*. Spectral Analysis of Heart Rate Without Resampling. / G.B. Moody // Computers in Cardiology. – 1993. – Proceedings. – P. 715 – 718. 9. *Malik, Marek*. Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования, разработанные рабочей группой Европейской Ассоциацией Кардиологии и Северо-Американской Ассоциацией Электрофизиологии и Кардиостимуляции / Marek Malik, J. Thomas Bigger, A. John Camm, Robert E. Kleiger, Alberto Malliani, Arthur J. Moss, Peter J. Schwartz ; под. общ. ред. Marek Malik – Европейский Кардиологический журнал. – 1996. – №3. – С. 354–381. 10. *Величко О.Н.* Передискретизация тахограммы. Проблема выбора интервала передискретизации. / О.Н. Величко, О.Е. Гапон // Системи обробки інформації. – 2014. – №9 (125). – С. 168 – 175.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.09.2014