

**О. М. ВЕЛИЧКО**, канд. техн. наук, доц., Национальный юридический университет имени Ярослава Мудрого, Харьков, **КАМПОС-ДИАС ХАВЕР ГУСТАВО**, асп., Харьковський національний університет радіоелектроніки, Харьков

### **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ QRS-КОМПЛЕКСОВ В ЭКГ-СИГНАЛАХ БЕЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ**

Предложен метод детектирования QRS-комплексов в сигналах без предварительной обработки данных, который базируется на технологии вейвлетного анализа. Определены характерные точки действительной и мнимой компонент сечения вейвлетного спектра, необходимые для распознавания границ комплексов. Объем выборки: 1800 10-секундных фрагментов ЭКГ. Точность метода составляет 99,9 % для базы ECG-ID Database. Ил.: 6. Библиогр.: 15 назв.

**Ключевые слова:** QRS-комплекс, вейвлетный анализ, сечение вейвлетного спектра, действительная и мнимая компоненты сечения.

**Постановка проблемы.** Точность определения границ *QRS*-комплексов имеет базовое значение при распознавании сигналов с клиническими проявлениями и используется врачами при поставке диагноза. Существующие методы детектирования *QRS*-комплексов показывают высокую точность, но требуют предварительной обработки исходного сигнала (фильтрации), что приводит, в конечном счете, к его изменению и потери информации [1]. Кроме того, высокоточные методы распознавания ЭКГ адаптированы к одному или двум отведениям, а публикации последних лет подтверждают высокий интерес исследователей к решению задачи распознавания элементов ЭКГ и разработке высокоточных методов, применимых к сигналам с клиническими проявлениями в разных отведениях.

**Анализ литературы.** Авторы метода [2] предложили алгоритм, который базируется на использовании примитивов, что улучшает качество выделения *R*-зубца. Входной сигнал предварительно отфильтровывается, в том числе, эмпирическими методами декомпозиции, что позволяет удалить и исключить флуктуации и помехи, обусловленные случайными движениями человека. Затем удаляется изолиния и производится морфологическая операция выделения *R*-пика. Для описания *QRS*-комплекса применяются примитивы, зависящие от формы и длительности *QRS*-комплекса. Левую и правую части *QRS*-комплекса описывают отдельно. Для уменьшения ошибки авторы вводят два масштабирующих коэффициента – вертикальный и горизонтальный,

позволяющие минимизировать ошибку. Метод чувствителен к форме комплекса и обеспечивает высокую точность детектирования только в сигналах с выраженными  $Q$ ,  $T$ -волнами и распознавание с ошибками в других случаях. Для устранения ошибок авторы предлагают увеличить ширину примитива, однако не поясняя, в каких пределах. Метод был программно реализован в микроконтроллерном блоке одноканального электрокардиографа и позволяет определять  $QRS$ -комплексы в режиме реального времени.

В основе метода распознавания структурных элементов ЭКГ [3] лежит принцип сравнения амплитуд отсчетов. Процедура предварительной обработки является обязательной и включает каскад цифровых фильтров нижних частот, верхних частот и заграждающего фильтра. Вначале производится поиск всех максимумов в сигнале, которые затем ранжируются в порядке убывания. На следующем шаге определяется максимум среди найденных пиков. Далее производится поиск всех пиков не ниже  $+k$  % максимального пика ( $k$  – среднее арифметическое двух значений: 60% от максимальной амплитуды ЭКГ и моды). Затем удаляются все пики, которые не превышают уже найденные более чем на  $0,2 mV$  в пределах  $0,2$  с. Наконец, устраняются ложные пики в нарастающем и ниспадающем фронтах  $R$ -зубца, обусловленные помехами.  $S$ -зубец обнаруживают справа от  $R$ -пика, в области отрицательных значений, в интервале длительностью 10% от длительности текущего кардиоцикла. Поиск  $Q$ -зубца производится слева от  $R$ -зубца и детектируется как минимальное отрицательное значение.  $T$ -зубец – это область положительных значений, следующих на  $QRS$ -комплексом, поиск которой выполняется на интервале шириной  $M$  ( $M = 12$  % от длительности текущего кардиоцикла).  $P$ -зубец также детектируется как область положительных значений на интервале  $2M$  отсчетов после  $T$ -зубца предыдущего цикла и  $M/4$  отсчетов перед  $R$ -пиком текущего кардиоцикла.

Авторы не указывают точность предлагаемого метода, который позволяет определять пики зубцов для ЭКГ, не имеющих отклонений в форме ее элементов, таких как расщепленные или инверсные зубцы и комплексы, а также не приводят описание принципа вычисления длительности основных волн.

В работе [4] описывается метод, сочетающий два этапа: предварительная обработка ЭКГ и детектирование  $QRS$ -комплексов. На первом этапе авторы применяют систему фильтров для устранения плавающей изолинии и высокочастотных помех. Далее производят разметку участков ЭКГ, выделяя пики (*peaks*) и пологие участки (*valleys*), которые затем объединяют, если они находятся на интервалах менее  $0,03$

с (кратчайшая волна в составе комплекса принимается равной 0,03 с). В сжатом таким образом сигнале выделяются вероятные *QRS*-комплексы путем сравнения математического ожидания и среднего квадратического отклонения с пороговыми значениями. Заключительным шагом является коррекция результатов путем исключения ложных пиков, находящихся близко друг от друга либо добавляются комплексы между далеко отстоящими друг от друга пиками. Чувствительность метода составляет 99,78 % для сигналов в I и II отведениях.

Авторы [5] проанализировали стандартные методы распознавания волн ЭКГ и предложили их разные сочетания, для разных тестовых баз данных и отведений. В работе использованы методы Пана-Томкинса [1], Elgendi et al. [6], Martinez et al. [7], Sun et al. [8]. Указанные методы имеют высокую чувствительность (выше 99%), однако предназначены исключительно для обработки сигналов в I и II отведениях.

В работе [9] предложен метод выделения *QRS*-комплексов с последующей сегментацией сигнала на базе двухуровневой сверточной нейронной сети (*Convolutional Neural Network, CNN*). Метод состоит из трех этапов: предварительной обработки сигнала, извлечение характерных участков. Каждый слой имеет два уровня: свертки (*1-D convolution*) и подвыборки (*subsampling*). На уровне свертки из сигнала извлекаются грубые участки, на уровне подвыборки – обнаруживаются точные детали. Все извлеченные признаки используются далее в многослойном персептроне (*Multi-Layer Perceptron*) для распознавания *QRS*-комплексов и их местоположения. Метод имеет высокую точность обнаружения *QRS*-комплексов (чувствительность – 99,77 %, ошибка – 0,32 %) для отведений *V2, V5*.

Авторы [10] предложили метод распознавания *QRS*-комплексов для многоканального электрокардиографа в режиме реального времени. Он включает шесть этапов: предварительная обработка ЭКГ, группирование каналов и формирование усредненных сигналов, обнаружение пиков, определение окна для *QRS*-комплексов, идентификация комплексов, не обнаруженных на предыдущих этапах, классификация комплексов по их морфологическим признакам. Для поиска пиков и комплексов производят сравнение амплитудных значений с пороговыми величинами в пределах заданной ширины окна, которая принимается меньше, чем ширина *T*-зубца. Для морфологического анализа комплексов была использована группа обучения. Чувствительность метода превышает 96%, погрешность определения длительности *QRS*-комплексов 12 %. Достоинством метода является возможность распознавания комплексов при аномальной проводимости и кардиостимуляции у пациентов с сердечной недостаточностью и сердечной ресинхронизирующей терапией.

В работе [11] предложен метод сегментации ЭКГ на базе *Neuro-fuzzy* модели и вейвлетного анализа средствами *Wavelet Packet Tree*. Авторы предлагают метод, включающий предварительную обработку сигнала, извлечение информативных признаков с их последующей классификацией. Для сжатия сигнала используется дискретное вейвлетное преобразование. Детализирующие коэффициенты 4-го порядка поступают на вход *Neuro-fuzzy* системы, где с помощью системы решающих правил производится детектирование *QRS*-комплексов.

Авторы [12] разработали метод поиска *QRS*-комплексов в режиме реального времени. Он включает этап предварительной обработки, извлечение признаков, оценку плотности вероятности, применение Байесовских решающих правил (расчет апостериорных вероятностей) и их последующее слияние. Для обучения системы формируется выборка из 40 эталонов ("*validated candidates*") в онлайн-режиме. Метод позволяет распознавать *QRS*-комплексы для отведений *II*, *V5* и имеет чувствительность  $87.48 \pm 14.21\%$ .

**Цель статьи** – описание метода распознавания *QRS*-комплексов, базирующемся на технологии вейвлетного анализа и отличающемся тем, что позволяет выделять границы комплексов в сигналах без предварительной обработки.

**Материалы и методы исследования.** Нами использовалась база медицинских сигналов *ECG-ID Database* [13], включающая записи ЭКГ в I отведении для 90 человек в течение 200 с, разделенных на 10-секундные фрагменты (1800 сигналов). Частота дискретизации 500 Гц, уровень квантования –  $2^{12}$ . Пример исходного сигнала представлен на рис. 1.

В качестве математического аппарата выбран вейвлетный анализ, который благодаря своим свойствам позволяет получить информацию об особенностях сигнала в частотно-временной области.

Непрерывное вейвлетное преобразование сигнала описывается формулой [14]

$$W_s(a, b) = f(s(t), \psi_{ab}(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где  $W_s(a, b)$  – вейвлетный спектр;  $a$  – масштаб;  $b$  – сдвиг во времени;  $\psi_{a,b}(t)$  – вейвлет;  $t$  – время.

Система базисных функций, по которой производится преобразование, формируется из материнского вейвлета согласно формуле

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right).$$

Ключевым моментом является выбор вейвлета, определяющего систему базисных функций и, соответственно, характер вейвлетного спектра. Это продемонстрировано на рис. 1, отображающим фрагмент исходного сигнала и его вейвлетные спектры, полученные с помощью вейвлетов "Мексиканская шляпа" и Мейера.

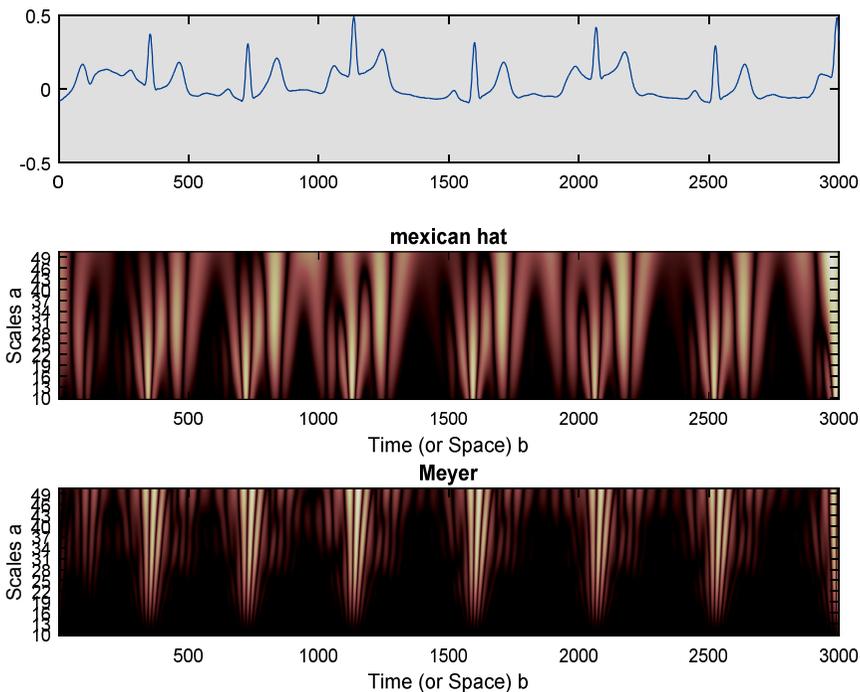


Рис. 1. Вейвлетные спектры ЭКГ

Мы провели численные эксперименты и установили, что для решения задачи поиска *QRS*-комплексов наиболее подходящим является вейвлет Морле (Morlet).

Вейвлет Морле (рис. 2) относится к комплексным, благодаря чему имеет хорошо локализованный во временной и частотной области базис. Характерный параметр  $\omega_0$  обеспечивает избирательность базиса, а мнимая и действительная части представляют собой амплитудно-модулированные колебания:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{t^2/2}.$$

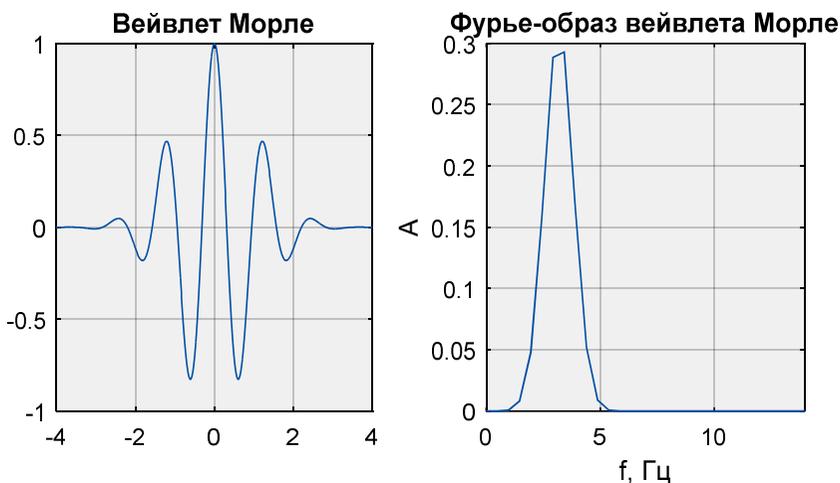


Рис. 2. Вейвлет Морле

Согласно источникам, в частности, [15], длительность *QRS*-комплексов варьируется в пределах от 60 мс до 200 мс и более. Это соответствует диапазону частот 5 – 16,67 Гц. Поэтому, сечения вейвлетного спектра на разных масштабах можно использовать как инструмент фильтрации в соответствующем частотном диапазоне. Учитывая связь между масштабом и частотой, мы провели серию вычислений и установили, что выделение *QRS*-комплексов целесообразно проводить на масштабе  $a = 0.036$  ( $f = 5$  Гц) при использовании вейвлета Морле.

Как видно из рис. 3 вейвлетный спектр имеет амплитудно-временные колебания, совпадающие с *QRS*-комплексами (на верхнем рисунке отображается нефильтрованный сигнал ЭКГ). Так как вейвлетный спектр, полученный с помощью комплексного вейвлета, имеет действительную и мнимую части, для выделения начальной и конечной точек предлагается использовать обе компоненты (рис. 4). Для наглядности на рис. 4 приводится отфильтрованный сигнал. При поиске информативных точек использовались амплитудно-временные выделенные *QRS*-комплексы тестовых сигналов (обозначены маркерами "o" на рис. 4). Сопоставление имеющей разметки комплексов с характерными точками действительной частей сечения вейвлетного спектра позволило выделить границы и вершину *QRS*-комплекса (рис. 4):

– вершина *R*-зубца соответствует максимуму колебаний действительной компоненты;

- начало *QRS*-комплекса совпадает с первым минимумом колебаний мнимой части сечения спектра;
- конец *QRS*-комплекса определяется последним минимумом действительной компоненты сечения спектра.

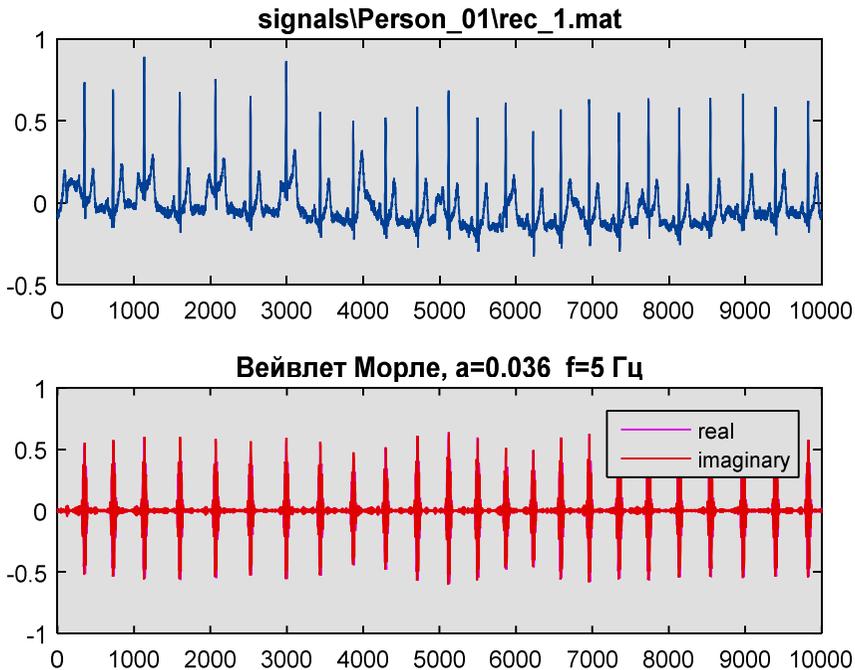


Рис. 3. ЭКГ и сечение вейвлетного спектра при  $a = 0.036$

Для наглядности на рис. 5 отображаются отфильтрованные сигналы. Каждый из сигналов имеет плавающую изолинию и высокий уровень шумов. Для сравнения на рис. 6 приведены выделенные *QRS*-комплексы, полученные на отфильтрованном сигнале (вверху) и на неотфильтрованном (внизу).

Сравнение результатов, полученных предлагаемым методом, с данными методов, реализованных в программном обеспечении [13], показало, что точность выделяемых *QRS*-комплексов составляет 99,9 %.

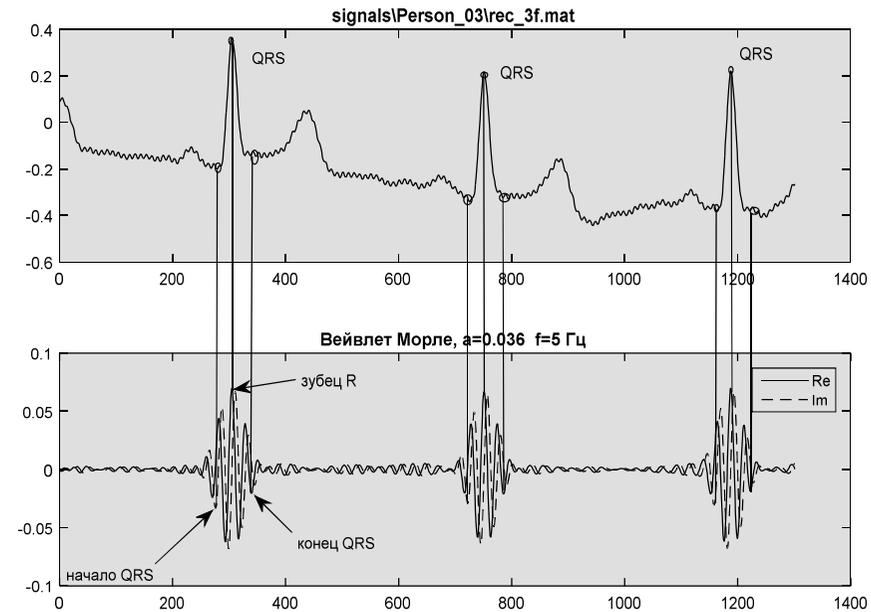


Рис. 4. Характерные точки для выделения *QRS*-комплексов

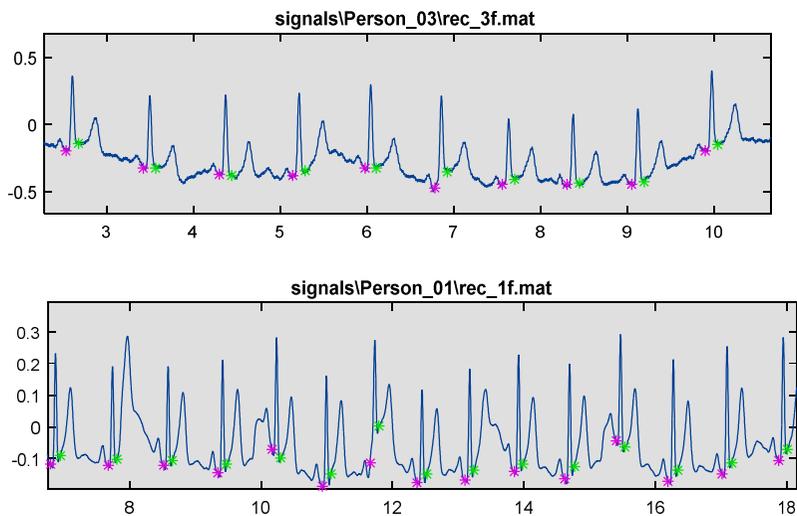


Рис. 5. Результаты поиска *QRS*-комплексов

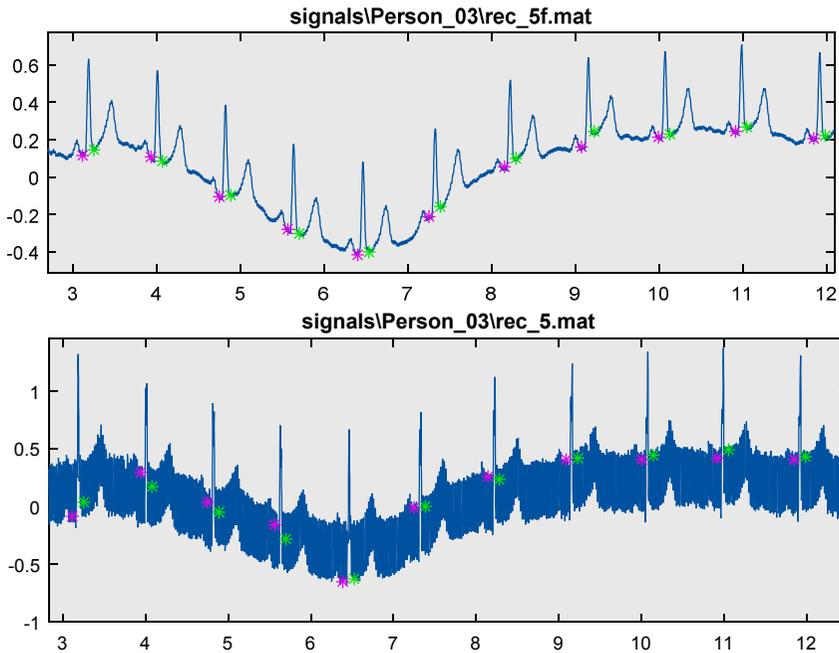


Рис. 6. Выделенные  $QRS$ -комплексы, отмеченные на отфильтрованном сигнале (вверху) и на неотфильтрованном (внизу)

**Выводы.** Предложен метод поиска  $QRS$ -комплексов, который базируется на технологии вейвлетного анализа и позволяет определять границы комплексов в сигналах без предварительной обработки. В качестве базового вейвлета используется комплексный вейвлет Морле. Предложены характерные точки действительной и мнимой компонент сечения вейвлетного спектра при  $a = 0.036$  для определения границ и вершины  $QRS$ -комплексов. Точность метода составляет 99,9%, что подтверждается проведенными расчетами 1800 10-секундных фрагментов ЭКГ тестовой базы сигналы. Последующие исследования ориентированы на адаптацию метода при поиске  $QRS$ -комплексов в других отведениях, в сигналах со сложной формой комплексов (расщепленный  $R$ -зубец) и расширением его возможностей для определения  $P$ - и  $T$ -волн.

#### References:

1. Rangayyan, R.M. (2015), *Biomedical Signal Analysis. 2nd ed.*, IEEE Press, 672 p.
2. Lee, S., Park, D., and Park, K.H. (2017), "QRS complex detection based on primitive", *Journal of communications and networks*, vol. 19, no 5, pp. 442-450.
3. Rajani, A., and Hamdi, M. (2019), "Automation algorithm to detect and quantify Electrocardiogram", paper presented at *1st International Workshop on Industrial Applications of Internet of Things (IIoT-2019)*, April 29 - May 2, 2019, Leuven, Belgium, pp. 941-946.

4. Burguera, A. (2018), "Fast QRS detection and ECG compression based on signal structural analysis", *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 23 , pp. 123-131.
5. Friganovic, K., Kukolja, D., Jovic, A., Cifrek, M., and Krstacic, G. (2018), "Optimizing the Detection of Characteristic Waves in ECG Based on Processing Methods Combinations", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 50609-50626.
6. Elgendi, M., Meo, M., and Abbott, D. (2016), "A proof-of-concept study: Simple and effective detection of P and T waves in arrhythmic ECG signals", *Bioengineering*, vol. 3, no. 4, doi: 10.3390/bioengineering3040026.
7. Martinez, A., Alcaraz, R., and Rieta, J.J. (2010), "A new method for automatic delineation of ECG fiducial points based on the phasor transform", paper presented at *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 31 Aug.- 4 Sept. 2010, Buenos Aires, Argentina, pp. 4586-4589.
8. Sun, K., Chan, L., and Krishnan S.M. (2005), "Characteristic wave detection in ECG signal using morphological transform", *BMC Cardiovascular Disorders*, vol. 5, article no. 28.
9. Xiang, Y., Lin, Z., and Meng, J. (2018), "Automatic QRS complex detection using two-level convolutional neural network", *BioMed Eng OnLine*, vol.17, doi: 10.1186/s12938-018-0441-4.
10. Curtin, A.E., Burns, K.V., Bank, A.J., and Netoff, T.I. (2018), "QRS Complex Detection and Measurement Algorithms for Multichannel ECGs in Cardiac Resynchronization Therapy Patients", *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, vol. 6, doi: 10.1109/JTEHM.2018.2844195.
11. Mahapatra, S., Mohanta, D., Mohanty, P., Nayak, S., and Behari, P. (2016), "A Neuro-fuzzy based model for analysis of an ECG signal using Wavelet Packet Tree", *Procedia Computer Science*, vol. 92, pp. 175-180.
12. Matthieu Doyen, M., Di Ge, D., Beuche'e, A., Carrault, G., Alfredo, I., and Hernandez, A.I. (2019), "Robust, real-time generic detector based on a multi-feature probabilistic method", *Plos one*, doi: 10.1371/journal.pone.0223785.
13. The official site PhysioNet (2019), "ECG-ID Database" available at: <https://www.physionet.org/content/ecgidb/1.0.0/>.
14. Howard, L., Resnikoff, and Wells, R.O. (2012), *Wavelet Analysis*, Imprint: Springer, 654 p.
15. Poole, J.E., Singh, J.P., and Birgersdotter-Green, U. (2015), "QRS Duration or QRS Morphology: What Really Matters in Cardiac Resynchronization Therapy?", *Journal of the American College of Cardiology*, vol. 69, pp. 1104-1117.

*Статью представила профессор, доктор технических наук, зав. каф. радиоэлектронных та биомедицинских компьютеризированных средств и технологий ХНУРЭ Высоцкая Елена Владимировна*

*Поступила 11.11.2019*

Olga Velychko, PhD Tech.  
Yaroslav Mudryi National Law University  
Str. Pushkinskaya, 77, Kharkiv, Ukraine, 61024  
Tel.: (57) 704-90-22, e-mail: o.velichko@nula.edu.ua  
ORCID ID: 0000-0001-9202-8411

Khaver Kampos Dias, postgraduate  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
Ave. Nauki, 11, Kharkiv, Ukraine, 61166  
Tel.: (057) 702-13-64, e-mail: khaver.kampos.dias@nure.ua  
ORCID ID: 0000-0002-1387-6576

УДК 615.47:616-072.7

**Метод визначення QRS-комплексів в ЕКГ-сигналах без попередньої обробки / Величко О.М., Кампос Диас Х.Г.** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 28 (1353). – С. 142 – 152.

Запропоновано метод детектування QRS-комплексів в сигналах без попередньої обробки даних, що базується на технології вейвлетного аналізу. Визначні характерні точки дійсної і уявної компонент перетину вейвлетного спектра, що необхідні для розпізнавання меж комплексів. Об'єм вибірки: 1800 10-секундних фрагментів ЕКГ. Точність методу складає 99,9 % для бази ECG-ID Database. Ил.: 6. Бібліогр.: 15 назв.

**Ключевые слова:** QRS-комплекс; вейвлетный анализ; сечение вейвлетного спектра; дійсна і уявна компонент перетину.

УДК 615.47:616-072.7

**Метод определения QRS-комплексов в ЭКГ-сигналах без предварительной обработки / Величко О.Н., Кампос Диас Х.Г.** // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 28 (1353). – С. 142 – 152.

Предложен метод детектирования QRS-комплексов в сигналах без предварительной обработки данных, который базируется на технологии вейвлетного анализа. Определены характерные точки действительной и мнимой компонент сечения вейвлетного спектра, необходимые для распознавания границ комплексов. Объем выборки: 1800 10-секундных фрагментов ЭКГ. Точность метода составляет 99,9 % для базы ECG-ID Database. Ил.: 6. Библиогр.: 15 назв.

**Ключевые слова:** QRS-комплекс; вейвлетный анализ; сечение вейвлетного спектра; действительная и мнимая компоненты сечения.

UDC 615.47:616-072.7

**Method of QRS complex definition in ECG signals without pre-processing / Velychko O.N., Campos Dias Kh.G.** // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – № 28 (1353). – P. 142 – 152.

The method based on the wavelet analysis technology for QRS-complex detection in signals without pre-processing had been proposed. The characteristic points of real and imaginary parts of the wavelet spectrum section for QRS-complex recognition had been determined. Volume of data series includes 1800 of 10-seconds duration ECG records. The method accuracy is 99,9% for ECG-ID Database. Figs.: 6. Refs.: 15 titles.

**Keywords:** QRS-complex; wavelet analysis; wavelet spectrum section; of real and imaginary parts.