



УДК 621.391

Б. Ф. Бадалян, О. А. Гомцян, С. Г. Гомцян  
Национальный политехнический университет Армении

## Вейвлет-анализ кардиосигналов в среде Matlab

Рассмотрена проблема точного обнаружения QRS-комплексов кардиосигналов с целью раннего диагностирования болезней сердечно-сосудистой системы человека. Для этой цели применяются различные алгоритмы, основанные либо на методах цифровой фильтрации, либо на математическом моделировании отдельных участков электрокардиограммы. Однако указанные методы имеют ряд недостатков, снижающих точность определения QRS-комплексов. В то же время вейвлет-преобразования, позволяющие практически безошибочно идентифицировать локальные особенности нестационарных сигналов, находят все большее применение в различных областях техники.

Представлено получение вейвлет-спектрограмм в среде Wavelet Toolbox с использованием различных вейвлетов и уровней декомпозиции. По амплитудам вейвлет-коэффициентов можно судить о наличии скачков, разрывов, т. е. идентифицировать QRS-комплекс. На основании сравнения вида QRS-комплекса и графиков масштабирующих функций различных вейвлетов определен наиболее оптимальный вейвлет для идентификации QRS-комплекса, а также шумоподавления в кардиосигналах.

Полученные результаты могут применяться не только в электрокардиографии, но и при решении задач идентификации и обработки сигналов различного типа.

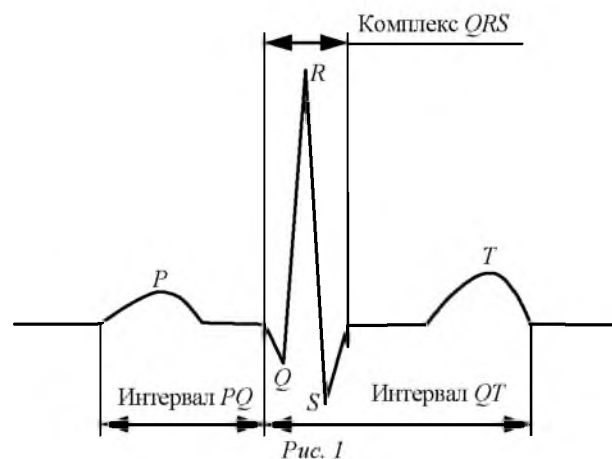
### Кардиосигнал, QRS-комплекс, вейвлет-преобразование, спектрограмма, сжатие

Рост числа заболеваний и смертей, связанных с функциональными нарушениями сердечно-сосудистой системы, является одной из важнейших проблем современной медицины. Актуальность решения проблемы повышения качества жизни людей посредством раннего диагностирования и продуктивного лечения различных кардиологических заболеваний является очевидной. Особо важным является процесс автоматизированного анализа громадной базы электрокардиографических данных.

В настоящее время для анализа электрокардиографических сигналов широко применяются методы фурье-анализа [1]. Однако результаты, полученные с помощью вейвлет-преобразований, обладают большей информативностью, точностью и меньшими вычислительными затратами в отличие от преобразований Фурье [2]. Вейвлеты имеют явные преимущества в представлении локальных особенностей сигналов по сравнению с различными спектральными методами.

В современной электрокардиографии большое значение уделяется анализу желудочковой активности сердца. Электрокардиограмма (ЭКГ) состоит из нескольких зубцов, сегментов и интервалов, отра-

жающих сложный процесс распространения волны возбуждения по сердцу (рис. 1). Самой важной частью ЭКГ является QRS-комплекс, с помощью которого можно судить об электрической активности сердца в процессе сокращения правого и левого желудочков [2]. Время начала и окончания комплекса, форма и амплитуда зубцов Q, R, S, а также длительности интервалов между ними позволяют судить о наличии у пациента таких заболеваний и синдромов, как инфаркт миокарда, тахикардия, нарушения



обмена электролитов, которые, в свою очередь, могут привести к фатальным последствиям.

Интервал  $PQ$  указывает на время, необходимое для прохождения электрического импульса через предсердия. Зубец  $R$  четко выделяется на ЭКГ, так как мышечные клетки желудочков многочисленны и деполяризуются синхронно. Интервал  $QT$  отражает совокупность процессов деполяризации желудочков сердца.

Таким образом, точность определения  $QRS$ -комплекса является базовой для всех остальных методов анализа ЭКГ-сигналов: оценки частоты и регулярности сердечных сокращений, классификации сердечных циклов и пр. В силу этого задача автоматического выявления  $QRS$ -комплекса на ЭКГ и определения его параметров имеет важное значение в кардиодиагностике.

Процесс определения  $QRS$ -комплексов условно можно разделить на две части: начальную обработку ЭКГ и принятие решений. Совокупность операций этих частей представлена на рис. 2.

Существующие методы определения  $QRS$ -комплексов подразделяются на следующие основные классы [1]:

- несинтаксические;
- синтаксические;
- трансформативные.

Несинтаксические методы базируются на использовании различных видов фильтров и математических моделях участков кардиосигнала.

Цифровая фильтрация получила широкое распространение в задаче идентификации  $QRS$ -комплексов, так как в 95 % случаев позволяет выделить их с необходимой точностью. К сожалению, указанные методы обладают большой сложностью аппаратной реализации, что обусловлено нестационарной природой ЭКГ-сигнала и необходимостью создания банков сложных адаптивных фильтров.

Методы, основанные на математических моделях участков ЭКГ, также обладают большой вычислительной сложностью и требуют ручной сегментации полученных данных.

Синтаксические методы позволяют выявить определенные характерные участки кардиосигнала с помощью заранее сформированного алфавита таких участков. Однако это довольно длительный и трудоемкий итеративный процесс, поскольку каждый раз алгоритм анализирует весь алфавит шаблонов.

Трансформативные методы также нашли широкое применение при анализе ЭКГ и идентификации  $QRS$ -комплексов. Они базируются на различных математических преобразованиях (Фурье, Гильберта и др.). Использование перечисленных преобразований позволяет выявить некоторые локальные особенности сигналов. Однако спектральные методы довольно чувствительны к шумовым компонентам сигналов, а также к форме и длительности их элементов, что существенно снижает точность идентификации  $QRS$ -комплексов.

До настоящего времени вейвлеты применялись для анализа кардиосигналов недостаточно широко. Следует отметить, что преимущество вейвлет-анализа заключается в возможности изучения высокочастотной составляющей сигнала, а также в возможности удаления шума, сжатия и сглаживания кардиосигнала.

Вейвлеты (wavelets) – обобщенное название особых функций, имеющих вид коротких волновых пакетов с нулевым интегральным значением и с той или иной, подчас очень сложной, формой, локализованных на оси независимой переменной и способных к сдвигу по ней и масштабированию (сжатию или растяжению) [3].

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала заключается в представлении сигнала или его фурье-образа обобщенным рядом по системе базисных функций

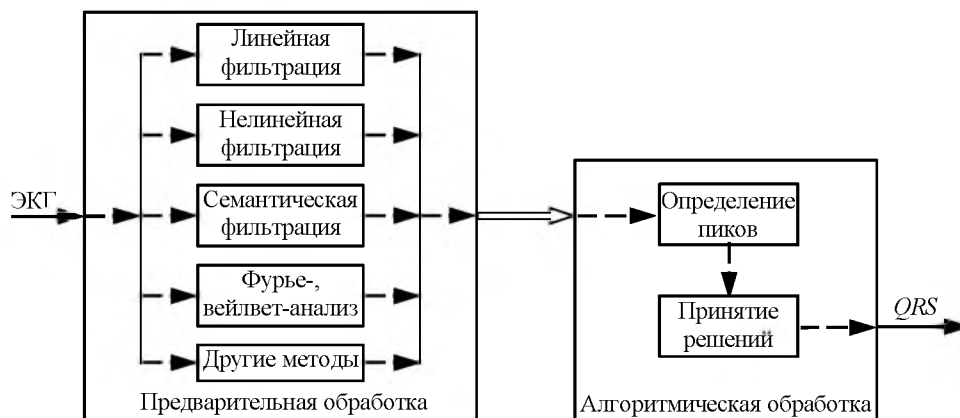


Рис. 2

$$\psi(t) = a^{-1/2} \psi_0\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

сконструированных из материнского (исходного) вейвлета  $\psi_0$ , обладающего определенными свойствами, путем сдвига во времени на величину  $b$  и изменения временного масштаба за счет коэффициента масштабирования  $a$ . Каждый набор коэффициентов  $a$  и  $b$  (1) определяет отдельный вейвлет [3].

Прямое непрерывное вейвлет-преобразование сигнала  $s(t)$  осуществляется аналогично преобразованию Фурье вычислением вейвлет-коэффициентов:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Обратное непрерывное вейвлет-преобразование выполняется по формуле реконструкции во временной области, которая в пакете Matlab R2015a имеет вид [4]

$$S(t) = \frac{1}{K_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C(a, b) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da db}{a^2},$$

где  $K_{\psi}$  – нормирующий коэффициент [4].

Для оценки эффективности обнаружения QRS-комплексов методами вейвлет-анализа в программной среде Wavelet Toolbox v.4.14 системы Matlab [5] авторами настоящей статьи реализована процедура вейвлет-разложения смоделированного кардиосигнала (рис. 3, а) с помощью вейвлета Добеши db5 пятого уровня разложения.

Вейвлет-спектрограмма исследуемого сигнала представлена на рис. 3, б. На ней отчетливо

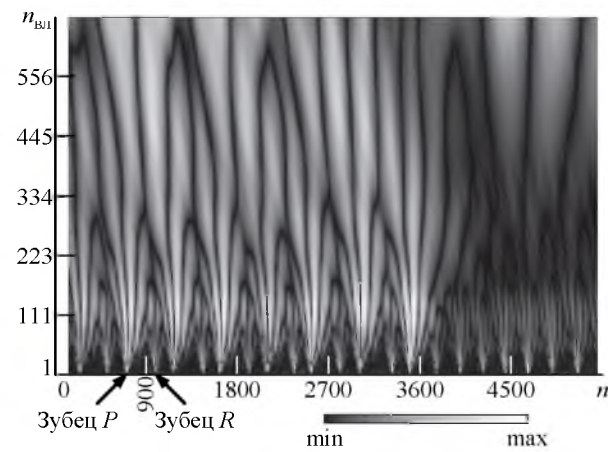
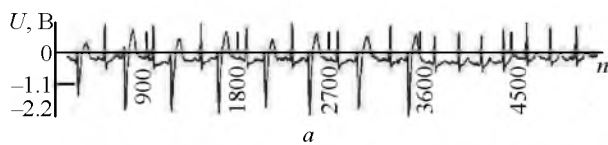


Рис. 3

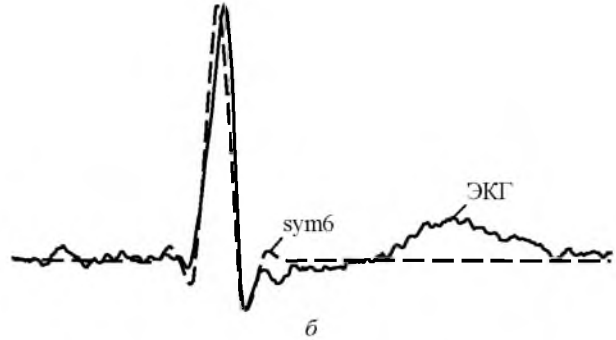
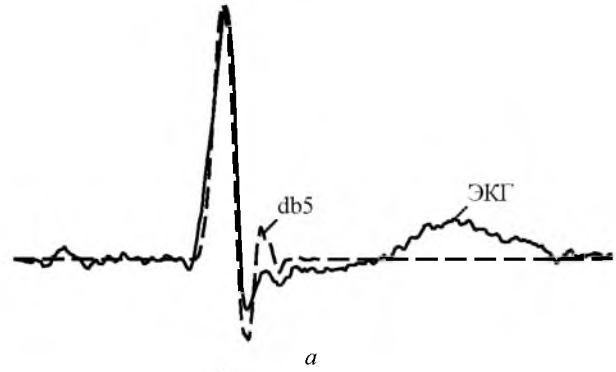


Рис. 4

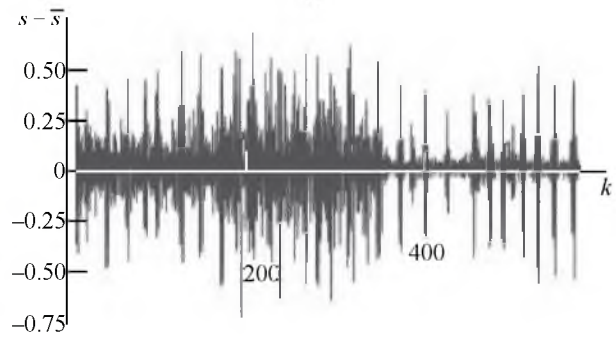
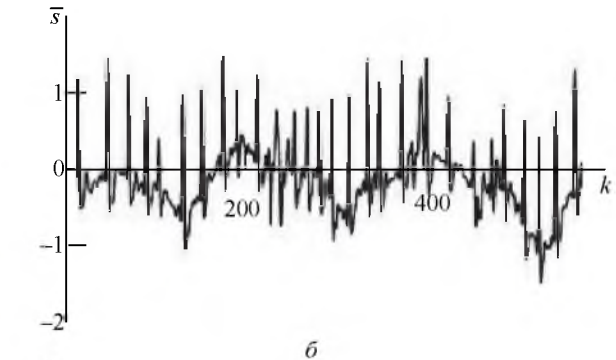
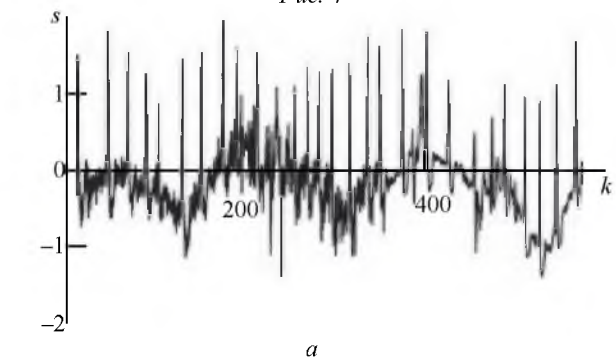


Рис. 5

виден *QRS*-комплекс на высоких частотах, а пик *T*-волны проявляется на более низких частотах. Хорошо отображены пик *P* и другие элементы на высоких частотах, незаметные на кардиограмме.

Кардиосигнал, получаемый современными кардиографами высокого разрешения, может иметь достаточно большой объем. Поэтому актуальным является его сжатие. Сжатие сигнала осуществляется посредством удаления высокочастотных шумовых компонентов кардиосигнала, что приводит к его сглаживанию.

Проведенные исследования показали, что для качественного шумоподавления кардиосигнала следует применить многоуровневую пороговую обработку детализирующих вейвлет-коэффициентов, смысл которой состоит в варьировании шумового порога. Кроме того, выявлено, что оптимальным вейвлетом для идентификации *QRS*-комплекса, а также сжатия и очистки кардиосигналов является вейвлет *sum6* (симлет), график масштабирующей функции  $\varphi(t)$  которого по своей форме существенно ближе к *QRS*-комплексу (рис. 4, б) по сравнению с функцией  $\psi(t)$  вейвлета *db5* (рис. 4, а).

На рис. 5 приведены исходный (а) и сжатый примерно в 10 раз (б) кардиосигналы, а также удаленный шумовой компонент (в), на основании которого могут быть получены статистические характеристики высокочастотных компонентов сигнала. Как видно из рис. 5, б, в сжатом кардиосигнале более четко отражены форма и местоположение зубцов, что облегчает дальнейшую обработку.

В настоящей статье показано, что с помощью полученной спектрограммы можно выделить компоненты ЭКГ-сигналов, имеющих разные частоты. На спектрограмме рис. 3 положительные пики кардиосигнала, соответствующие частотам 500, 1000, 1500 Гц и т. д., отображают комплекс *QRS*, зубцы *P* и *T* кардиосигнала, а также другие элементы, которые незаметны на кардиограмме. Исследование графиков базисных функций вейвлет-коэффициентов показало, что для обнаружения *QRS*-комплексов оптимальными являются симлеты. По сравнению с [1] осуществлены вейвлет-очистка и сжатие кардиосигнала, что позволяет улучшить точность определения *QRS*-комплексов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ладьев Д. А. Алгоритм обнаружения *QRS*-комплексов ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Мордов. гос. ун-т им. Н. П. Огарева. Саранск, 2007. 22 с.

2. Ishikawa Y., Mochimaru F. Wavelet Theory-Based Analysis of High-Frequency, High-Resolution Electrocardiograms: A New Concept for Clinical Uses // Progress in biomedical Research. 2002. Vol. 7, № 3. P. 179–184.

3. Смоленцев Н. К. Вейвлет-анализ в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2010. 448 с.

4. Бадалян Б. Ф., Гомцяц О. А., Егоян Г. К. Реконструкция сложных сигналов после многоуровневого вейвлет-преобразования // Материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций" (РТ-2014). Севастополь, 12–17 мая 2014 г. / Севастопольский национ. техн. ун-т. Севастополь, 2014. С. 238.

5. URL: [http://feihu.eng.ua.edu/NSF\\_TUES/w7\\_1a.pdf](http://feihu.eng.ua.edu/NSF_TUES/w7_1a.pdf) (дата обращения: 26.12.2017).

Статья поступила в редакцию 17 октября 2017 г.

Для цитирования: Бадалян Б. Ф., Гомцяц О. А., Гомцяц С. Г. Вейвлет-анализ кардиосигналов в среде Matlab // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2017. № 6. С. 5–9.

**Бадалян Бенямин Феликсович** – кандидат технических наук (2010), доцент (2014) кафедры радиоустройств Национального политехнического университета Армении. Автор более 30 научных публикаций. Сфера научных интересов – помехоустойчивое кодирование; системы подвижной радиосвязи; вейвлет-анализ сигналов; аналоговая и цифровая электроника; криптография.  
E-mail: [agentben@ Rambler.ru](mailto:agentben@ Rambler.ru)

**Гомцяц Оганес Авакович** – доктор технических наук (2016), доцент (1986), заведующий кафедрой радиоустройств Национального политехнического университета Армении. Автор более 50 научных публикаций. Сфера научных интересов – аналого-цифровое преобразование; методы кодирования; цифровая обработка сигналов; системы мобильной связи.  
E-mail: [rygrig@seua.am](mailto:rygrig@seua.am)

**Гомцяц Светлана Геворковна** – соискатель (2016) кафедры радиоустройств Национального политехнического университета Армении. Автор 5 научных публикаций. Сфера научных интересов – аналоговая и цифровая электроника; радиопередающие устройства; вейвлет-анализ сигналов.  
E-mail: [gomtsyan.sveta@gmail.com](mailto:gomtsyan.sveta@gmail.com)

B. F. Badalyan, H. A. Gomtsyan, S. G. Gomtsyan  
National Polytechnic University of Armenia

### Wavelet-Analysis of Cardiosignals Using Matlab

**Abstract.** This article is devoted to the problem of accurate detection of cardiosignal QRS-complexes for early diagnosis of various diseases of human cardiovascular system. For that purpose various algorithms based on either digital filtering methods or mathematical modeling of ECG signal particular sections are used. However, all listed methods have a number of disadvantages impairing the accuracy of QRS-complex determination. Yet wavelet transforms enabling accurate identification of local features for non-stationary signals are becoming more common in various fields of technology.

The article presents wavelet spectrogram calculation by means of various wavelets and levels of decomposition in the Wavelet Toolbox environment. Based on wavelet coefficient amplitudes, the presence of jumps, discontinuities, i.e. QRS complex can be identified. In addition, by comparing the form of the QRS complex and the graph of the scaling function of different wavelets, the most optimal wavelet is determined for identifying the QRS complex, as well as noise suppression in cardiosignals.

The obtained results can be used not only in electrocardiography, but also in solving problems of identification and processing of various types of signals.

**Key words:** Cardiosignal, QRS-Complex, Wavelet Transform, Spectrogram, Compression

### REFERENCES

1. Ladyaev D. A. *Algoritm obnaruzheniya QRS-kompleksov EKG-signalov na osnove veivlet-preobrazovaniya* [Algorithm for ECG Signal QRS-Complex Detection Based on Wavelet Transforms: Abstr. ... Ph.D.]. Saransk, 2007, 22 p. (In Russian)
2. Ishikawa Y., Mochimaru F. Wavelet Theory-Based Analysis of High-Frequency, High-Resolution Electrocardiograms: A New Concept for Clinical Uses. *Progress in biomedical Research*. 2002, vol. 7, no. 3, pp. 179–184.
3. Smolentsev N. K. *Veivlet-analiz v MATLAB* [Wavelet Analysis in MATLAB]. Moscow, DMK Press, 2010, 448 p. (In Russian)
4. Badalyan B. F., Gomtsyan O. A., Egoyan G. K. Reconstruction of Complex Signals after Multi-Level Wavelet Transform. *Materialy 10-i Mezhdunar. nauchno-tekhnich. konferentsii "Sovremennye problemy radiotekhniki i telekommunikatsii"* (RT-2014) [X Intern. Scientific and Technical Conf. "Modern Problems of Radio Engineering and Telecommunications"]. Sevastopol, 2014, p. 238. (In Russian)
5. Available at: [http://feihu.eng.ua.edu/NSF\\_TUES/w7\\_1a.pdf](http://feihu.eng.ua.edu/NSF_TUES/w7_1a.pdf) (accessed: 26.12.2017).

Received October, 17, 2017

**For citation:** Badalyan B. F., Gomtsyan H. A., Gomtsyan S. G. Wavelet-Analysis of Cardiosignals Using Matlab. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 6, pp. 5–9. (In Russian)

**Beniamin F. Badalyan** – Ph.D. in Engineering (2010), Associate Professor (2014) of the Department of Radio Devices of National Polytechnic University of Armenia. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: error correction coding; mobile radio communication systems; wavelet-analysis of signals; analog and digital electronics; cryptography.

E-mail: agentben@rambler.ru

**Hovhannes A. Gomtsyan** – D.Sc. in Engineering (2016), Associate Professor (1986), the Chair of Department of Radio Devices of National Polytechnic University of Armenia. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: analog-digital conversion; encoding methods; digital signal processing; mobile communication systems.

E-mail: rygrig@seua.am

**Svetlana G. Gomtsyan** – External Ph.D. student (2016) of the Department of Radio Devices of National Polytechnic University of Armenia. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: analog and digital electronics; radio-transmitting devices; wavelet-analysis of signals.

E-mail: gomtsyan.sveta@gmail.com