

УДК 616.12; 681.3:61

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЙ ОПОРНЫХ ТОЧЕК QRS-КОМПЛЕКСОВ В ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЕ

О.О. Жаринов, И.О. Жаринов

Рассматривается применение корреляционно-экстремального метода для решения задач обнаружения и оценивания опорных точек QRS-комплексов в электрокардиограмме (ЭКГ). Получены рабочие характеристики обнаружения и точностные характеристики оценивания местоположений максимумов R-зубцов на ЭКГ.

Ключевые слова: электрокардиография, обнаружение и оценивание, QRS-комплекс.

Введение

При создании комплексов автоматизированной обработки электрокардиограмм (ЭКГ) одной из основных является проблема выделения желудочковых комплексов из регистрируемого процесса, объединяющая задачу обнаружения QRS-комплекса, т.е. установление факта его наличия на некотором участке сигнала, и задачу оценивания положений его опорных точек на оси времени, в первую очередь, точки максимума R-зубца k_R , используемой для измерения RR-интервалов, по которым оценивается ритм сердца. В настоящее время существует множество методов и алгоритмов решения таких задач [1–5], однако при их описании авторы, как правило, не приводят научного обоснования особенностей их практической реализации. В первую очередь это относится к обоснованию объемов анализируемых обучающих и контрольных выборок ЭКГ, уровня достоверности распознавания, точностных оценок.

Для решения задач обнаружения и оценивания положений QRS-комплексов в кардиограмме предлагается использовать корреляционный метод, основанный на расчете значений коэффициентов корреляции $r[k]$ между значениями массива $x_i[n]$, содержащего N дискретных отсчетов «эталонного» QRS-комплекса, задаваемого для каждого конкретного индивидуума из реализации его ЭКГ, и отсчетами обрабатываемого массива ЭКГ $x_j[n]$, содержащего $N_{ЭКГ}$ отсчетов ($N_{ЭКГ} \gg N$), в котором необходимо определить местоположения QRS-комплексов по формуле

$$r[k] = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (x_i[n] - m_i)(x_j[n+k] - m_j[k])}{\sqrt{\left[\sum_{n=0}^{N-1} (x_i[n] - m_i)^2 \right] \left[\sum_{n=0}^{N-1} (x_j[n+k] - m_j[k])^2 \right]}}, \quad k=0, 1, \dots, N_{ЭКГ}-N-1,$$

где

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_i[n], \quad m_j[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_j[n+k]$$

на скользящем временном окне для всех отсчетов записи ЭКГ.

Принятие решения об обнаружении QRS-комплекса на анализируемом интервале ЭКГ производится в соответствии с правилами, принятыми в теории обнаружения, $r[k] > C$, и теории оценивания параметров, $k_R = \arg \max_k \{ \forall k : r[k] > C \} + N/2$. Характеристики метода существенно зависят от деталей его практической реализации – выбора значения N и порогового уровня C , значения частоты дискретизации f_d , свойств сигнала и помех и отношения сигнал/шум q в обрабатываемом процессе.

Основной задачей исследования корреляционно-экстремального метода является обоснование минимально-достаточного количества отсчетов длины эталона N , при котором характеристики обнаружения и оценивания опорных точек QRS-комплекса будут не хуже заданных. Другой важной задачей является обоснование необходимого значения порогового уровня принятия решения C .

Метод исследования

Решающее правило обнаружения строится на основе критерия Неймана–Пирсона. Величина порогового уровня C определяется с учетом изначально заданного уровня вероятности допустимой ошибки P_F (ложного обнаружения QRS-комплекса на анализируемом интервале), характеристик распределения максимумов коэффициентов корреляции при текущем значении отношения сигнал/шум q и длины эталона N (рис. 1). При этом под P_F подразумевается интенсивность ложных срабатываний алгоритма – коли-

чество ошибочно принятых решений о наличии QRS-комплекса на участке реализации ЭКГ, где он объективно отсутствует, в единицу времени.

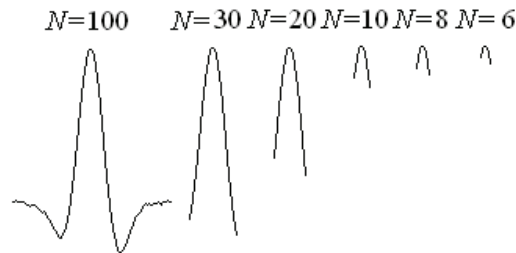


Рис. 1. Примеры реализаций эталонного QRS-комплекса ЭКГ (для стандартного значения частоты дискретизации ЭКГ $f_d = 1/\Delta t_d = 1000$ Гц, где Δt_d – интервал дискретизации) с различным числом отсчетов N

Экспериментальные исследования корреляционно-экстремального метода обнаружения и оценивания опорных точек положения QRS-комплексов проводились [6] на модельных реализациях ЭКГ для разных сочетаний $P_F = \langle 0,05; 0,01; 0,005; 0,001 \rangle$, $N = \langle 6; 8; 10; 20; 30; 100 \rangle$ и $q = \langle 1, 2, \dots, 15 \rangle$ при заданном значении частоты дискретизации $f_d = 1000$ Гц методом математического моделирования. Модель ЭКГ задавалась в виде аддитивной смеси детерминированного полезного сигнала QRS-комплекса с параметрами физиологической нормы и широкополосного гауссовского шума. Гипотеза о нормальности распределения шума имеет многочисленные экспериментальные подтверждения. Отношение сигнал/шум определено как отношение среднеквадратического значения сигнала полного QRS-комплекса длиной 100 отсчетов к среднеквадратическому значению шума (рис. 2).

Характеристики обнаружения и точности оценивания положения максимумов R-зубца на временной оси определялись по реализациям ЭКГ, содержащим 2000 QRS-комплексов.

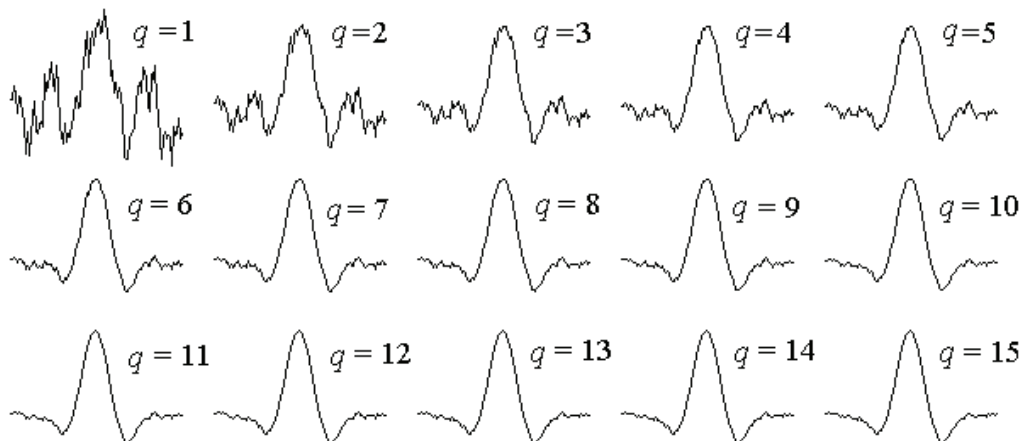


Рис. 2. Примеры реализаций ЭКГ человека на интервале наличия QRS-комплекса при различных отношениях сигнал/шум $q = \langle 1, 2, \dots, 15 \rangle$

Полученные результаты

Для выбора порогового уровня принятия решения C производилось исследование распределения максимумов коэффициентов корреляции при различных отношениях сигнал/шум q и длины временного окна N . Пример одного из практически важных результатов приведен на рис. 3. Для решения задачи выбора необходимого значения порогового уровня C и синтеза обнаружителя по критерию Неймана-Пирсона построено семейство зависимостей, представленных на рис. 4.

Семейство характеристик обнаружения $P_D(q)$ для корреляционно-экстремального метода обнаружения QRS-комплексов ЭКГ при различных значениях N и P_F приведено на рис. 5. Анализ представленных на рис. 5, а, и рис. 5, б, зависимостей показывает, что при $N > 30$ вероятность правильного обнаружения QRS-комплекса превышает 0,95 даже при весьма низком отношении сигнал/шум $q = 2$ – значении, характерном для записей нагрузочных ЭКГ и холтеровского мониторинга. Для ЭКГ покоя, при практически гарантированном $q > 10$ для достижения $P_D > 0,95$ возможно уменьшение длины эталона вдвое, что позволит сократить объем требуемых вычислений $r[k]$ в четыре раза, а при $N > 30$ обнаружение будет практически достоверным, с $P_D > 0,999$ при $P_F < 0,001$ (рис. 5, в).

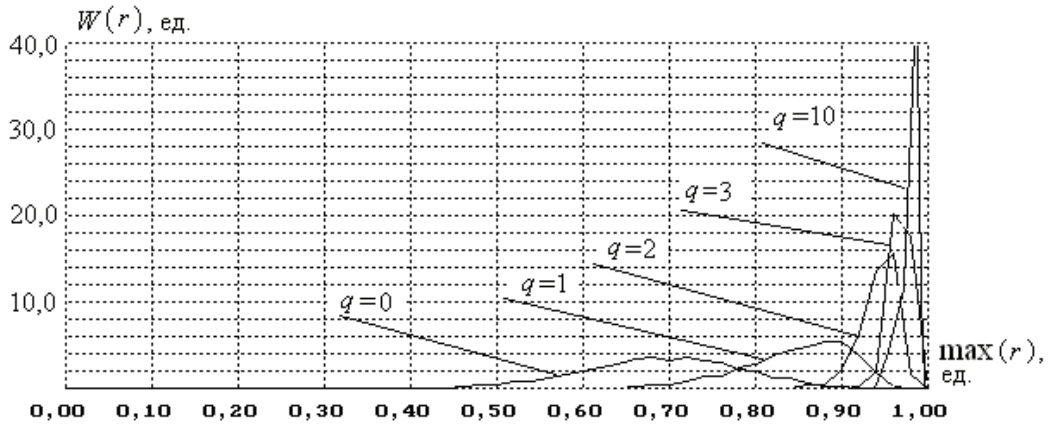


Рис. 3. Результат экспериментальной оценки распределения максимумов коэффициентов корреляции при различных отношениях сигнал/шум q для случая $N=30$

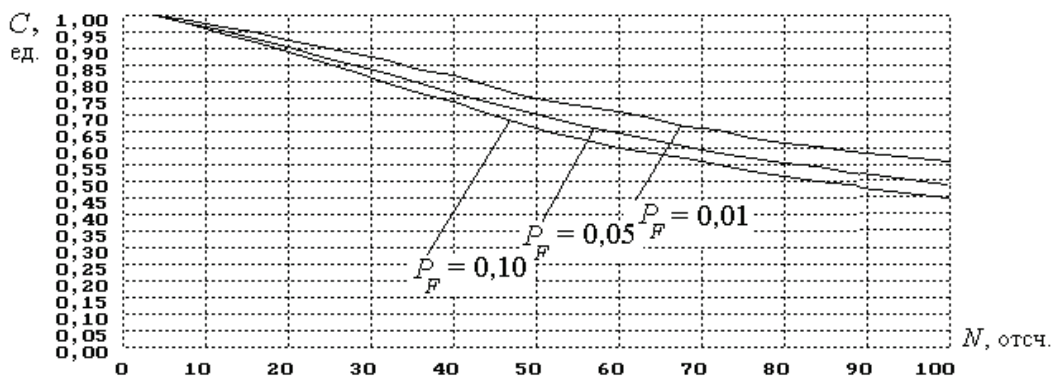


Рис. 4. Семейство зависимостей требуемого порогового уровня C для решающего правила алгоритма обнаружения $(r[k] > C)$ от числа отсчетов N и вероятности P_F

Количественные характеристики точности оценивания на временной оси опорных точек обнаруженных QRS-комплексов определялись по следующим формулам:

– смещение
$$m = \frac{1}{N_{об}} \sum_{k=1}^{N_{об}} \Delta t[k],$$

– дисперсия
$$D = \frac{1}{N_{об} - 1} \sum_{k=1}^{N_{об}} (\Delta t[k] - m)^2.$$

Здесь $N_{об}$ – количество правильно обнаруженных QRS-комплексов; $\Delta t[k]$ – значение ошибки оценивания местоположения k -го обнаруженного QRS-комплекса на оси времени.

Гистограммы $W(\Delta t)$ значений ошибки оценивания положения максимума R-зубца QRS-комплекса электрокардиограммы корреляционно-экстремальным методом приведены на рис. 6. Анализ рис. 6, а–г, показывает, что при малых отношениях сигнал/шум и $N \leq 10$ закон распределения ошибок является полимодальным, но в случае $q \geq 3$ становится унимодальным, отражая тенденцию группирования оценок возле истинного значения оцениваемого параметра. При $N=30$ (рис. 6, д, е) распределение является унимодальным даже при малых отношениях сигнал/шум, что упрощает анализ погрешностей методов обработки ЭКГ в реальном времени, использующих, например, технологию усреднения QRS-комплексов [7].

Количественные характеристики полученных оценок приведены в таблице, из которой следует, что точностные характеристики корреляционно-экстремального метода оценивания положений R-зубцов на оси времени улучшаются при увеличении длины эталона N и отношения сигнал/шум q . Важно отметить, что смещение оценок не имеет принципиального значения, тогда как их дисперсия определяет степень искажения формы сигнал-усредненной ЭКГ. С этой точки зрения необходимо стремиться к получению ее минимально возможного значения, что достигается использованием больших значений N , однако величина дисперсии оценки положения опорной точки максимума R-зубца имеет нижний ненулевой предел вследствие погрешностей квантования аналогового сигнала по времени.

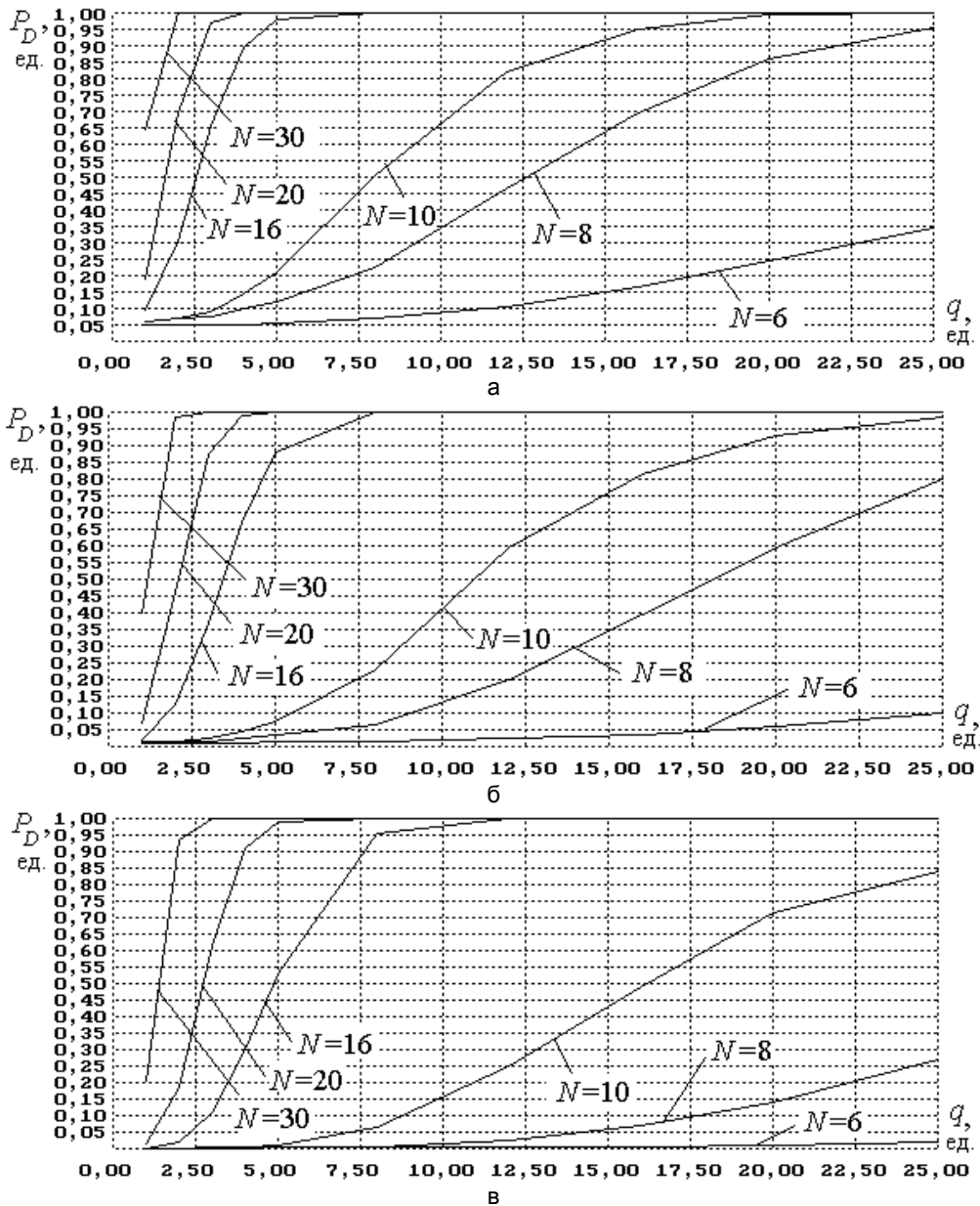


Рис. 5. Семейство характеристик обнаружения $P_D(q)$ для корреляционно-экстремального метода обнаружения QRS-комплексов ЭКГ при различных значениях N и фиксированном значении P_F : для $P_F=0,05$ (а); $P_F=0,01$ (б); $P_F=0,001$ (в)

$P_F=0,05$												
	m , отсч.						D , отсч ² .					
	$N=6$	$N=8$	$N=10$	$N=16$	$N=20$	$N=30$	$N=6$	$N=8$	$N=10$	$N=16$	$N=20$	$N=30$
$q=1$	3,56	2,76	2,18	0,77	0,44	0,04	4,27	3,98	3,17	1,81	1,61	1,43
$q=2$	3,32	1,67	0,96	0,26	0,07	0,04	2,68	1,98	1,64	0,97	0,89	0,73
$q=3$	2,06	0,96	0,40	0,07	0,03	0,03	1,86	1,27	1,07	0,73	0,61	0,50
$q=4$	1,31	0,58	0,28	0,02	0,02	0,02	1,34	1,03	0,77	0,56	0,46	0,35
$P_F=0,01$												
	m , отсч.						D , отсч ² .					
	$N=6$	$N=8$	$N=10$	$N=16$	$N=20$	$N=30$	$N=6$	$N=8$	$N=10$	$N=16$	$N=20$	$N=30$
$q=1$	3,94	3,00	2,19	0,74	0,51	0,04	4,32	3,70	3,33	1,89	1,57	1,40
$q=2$	3,15	1,76	0,94	0,26	0,07	0,03	2,62	2,25	1,62	0,97	0,87	0,74
$q=3$	2,13	0,90	0,43	0,09	0,03	0,02	1,99	1,19	1,08	0,72	0,61	0,50
$q=4$	1,12	0,55	0,28	0,02	0,02	0,01	1,36	1,07	0,77	0,56	0,46	0,36

Таблица. Оценки точностных характеристик определения положений максимумов R-зубцов на ЭКГ

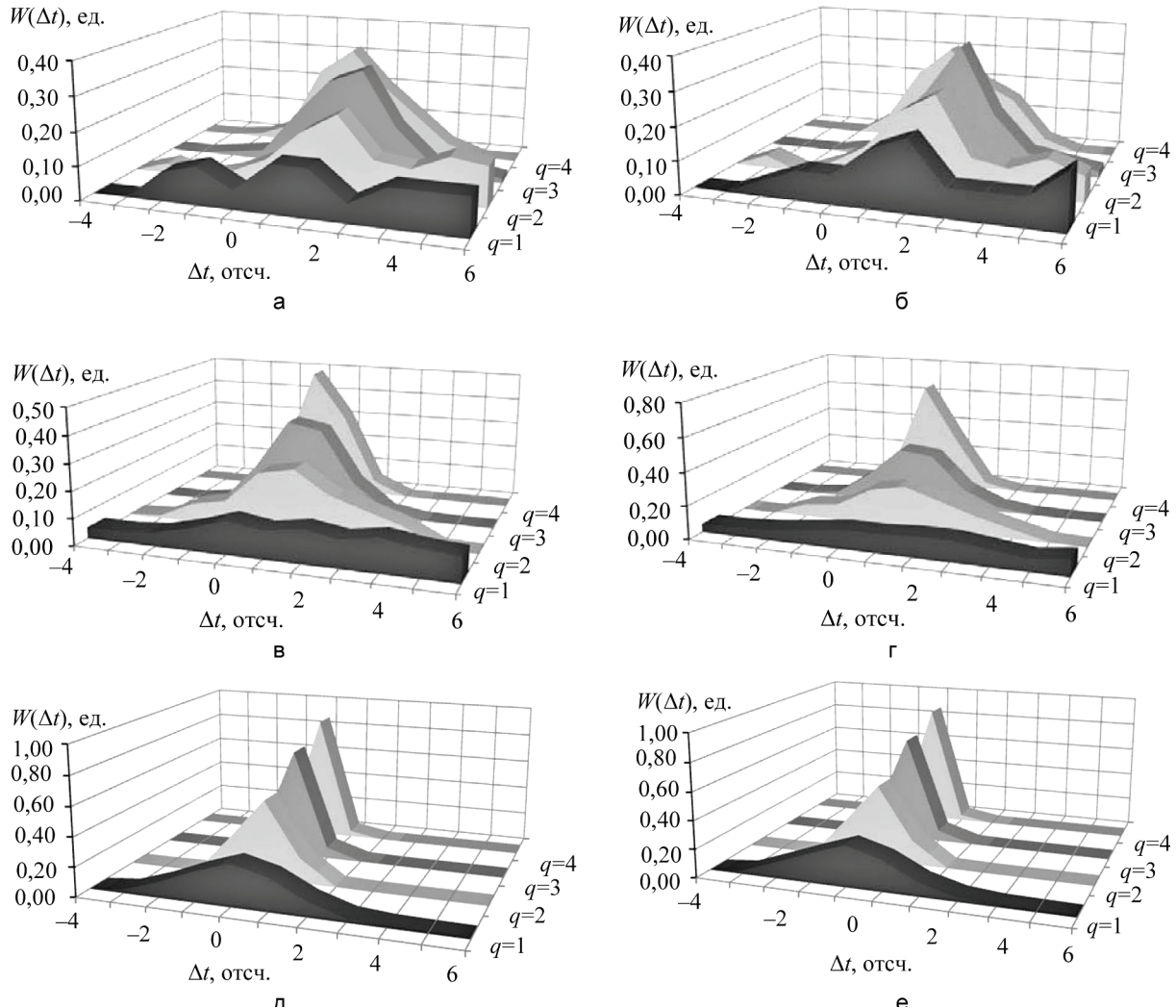


Рис. 6. Гистограммы $W(\Delta t)$ значений ошибки оценивания положения максимума R-зубца QRS-комплекса электрокардиограммы корреляционно-экстремальным методом для: $N=6, P_F=0,05$ (а); $N=6, P_F=0,01$ (б); $N=10, P_F=0,05$ (в); $N=10, P_F=0,01$ (г); $N=30, P_F=0,05$ (д); $N=30, P_F=0,01$ (е) при частоте дискретизации 1000 Гц

Заключение

Методы вторичной обработки реализаций ЭКГ-сигнала, к которым относится рассмотренный корреляционно-экстремальный метод обнаружения QRS-комплексов электрокардиограммы, предполагают использование в качестве исходных данных дискретных реализаций ЭКГ, прошедших процедуру первичной обработки как на аппаратном, так и на программном уровне (цифровая фильтрация в области верхних и нижних частот, аппроксимация дрейфа нулевой линии, режекторная фильтрация и т.д.). В итоге на практике для вторичной обработки предъявляется реализация ЭКГ при отношении сигнал/шум, превышающем 10–15 раз.

Анализ представленных на рис. 5, а–в, характеристик позволяет утверждать, что достоверное обнаружение QRS-комплексов в зашумленной ЭКГ корреляционно-экстремальным методом достигается при отношении сигнал/шум $q > 7$ по критерию Неймана–Пирсона на уровне вероятности ложной тревоги в диапазоне $P_F \in [0,05; 0,001]$ при задании формы эталонного QRS-комплекса 20-ю дискретными отсчетами. Как следует из рис. 1, последовательность из 20-ти отсчетов ЭКГ аппроксимирует участок зубца R не в полной мере, однако оказывается достаточной для гарантированного установления факта наличия QRS-комплекса на анализируемом участке реализации. Из рис. 6, а–е, и данных таблицы также можно сделать вывод, что точность оценивания максимума R-зубца на оси времени зависит от N, q, P_F и становится приемлемой для практики уже при $N > 10$ для $q > 4$.

Таким образом, при задании формы эталонного QRS-комплекса ЭКГ набором из 20-ти дискретных отсчетов (при $f_d=1000$ Гц), отношении сигнал/шум $q > 7$ и вероятности ложной тревоги на уров-

не $P_f \in [0,05; 0,001]$ возможно достоверное обнаружение на ЭКГ QRS-комплексов с характеристиками точности оценивания временного положения, близкими к потенциально достижимым при $f_d=1000$ Гц.

Представляется очевидным, что показатели качества корреляционно-экстремального метода обнаружения QRS-комплексов электрокардиограммы можно существенно улучшить при использовании одновременной регистрации нескольких отведений ЭКГ, их обработки и агрегировании решений, принятых в каждом отведении ЭКГ, в единое решающее правило, по аналогии с применяемыми в клинической медицинской практике методиками расшифровки ЭКГ.

Литература

1. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ / Под ред. А.Л. Барановского, А.П. Немирко. – М.: Радио и связь, 1993. – 248 с.
2. Микрокомпьютерные медицинские системы. Проектирование и применения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 544 с.
3. Выделение QRS-комплексов в компьютерных ЭКГ-системах / В.А. Нагин, И.В. Потапов, С.В. Селищев // Труды международной конференции по биомедицинскому приборостроению «Био-медприбор-2000». – М., 2000. – Ч. 1. – С. 120–121.
4. Friesen G.M. et al. A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1990. – V. 37. – № 1. – P. 85–98.
5. Dotsinsky I.A., Stoyanov T.V. Ventricular beat detection in single channel electrocardiograms / BioMedical Engineering OnLine 2004. – V. 3. – № 3. – 9 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/3/1/3>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.01.2010.)
6. Жаринов О.О., Жаринов И.О. Программа исследования на ЭВМ корреляционно-экстремального алгоритма обнаружения QRS-комплексов электрокардиограммы. – М.: ВНИИЦ, № 50200300257. – 2003. – Авт. свид. ОФАП № 2466 от 17.06.2003.
7. Жаринов О.О., Жаринов И.О. Электрокардиография высокого разрешения: новый подход к обработке сигнала // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2006. – № 33. – С. 106–120.

Жаринов Олег Олегович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кандидат технических наук, доцент, zharinov73@hotmail.ru
Жаринов Игорь Олегович – СПб ОКБ “Электроавтоматика” имени П.А. Ефимова, кандидат технических наук, доцент, igor_rabota@pisem.net