

**ОСОБЕННОСТИ ЭНТРОПИЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО  
ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ  
ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА**

*В. Г. Полосин*

**PECULIARITIES OF ENTROPY-PARAMETRIC  
INVESTIGATION OF INTERMEDIARY INTERVALS  
OF ELECTRIC CARDIO SIGNAL**

*V. G. Polosin*

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Внедрение мобильных информационных технологий сформировало предпосылки для совершенствования алгоритмов медицинского диагностического оборудования. Предметом исследования являются методы определения диагностически значимых интервалов электрокардиосигнала (ЭКС). Цель работы состоит в исследовании возможностей информационно-вероятностных технологий для анализа ЭКС. *Материалы и методы.* В работе рассмотрен качественно новый подход обработки и анализа ЭКС, согласно которому исследование интервалов ЭКС основано на изменении активности кардиомиоцитов в зависимости от фазы развития потенциала действия и базируется на взаимосвязи производных и информационной энтропии значений ЭКС от термодинамической активности тканей сердца. *Результаты.* На основе исследования вероятностной и информационной неопределенности значений ЭКС построены обнаружители *QRS*-комплекса, содержащие дополнительные возможности оценки положения максимума *R*-зубца и, как следствие, определения *RR*-интервалов ЭКС, необходимого для расчета частоты сердечных сокращений и для исследования вариабельности сердечного ритма. Реализация оператора суммы второй и третьей производных при построении обнаружителей *QRS*-комплекса и зубцов ЭКС базируется на контроле временной зависимости суммы центральных моментов третьего и четвертого порядка, рассчитываемых для выборки значений ЭКС в скользящем окне. Нелинейная зависимость моментов высокого порядка от разницы между значениями в скользящем окне обеспечивает достоверное обнаружение *QRS*-комплекса и зубцов ЭКС. *Выводы.* Благодаря комбинированному исследованию информации и вероятностных свойств ЭКС были разработаны универсальные инструменты для обнаружения различных эпох кардиоцикла. Использование взаимосвязи информационной и вероятностной неопределенностей значений ЭКС скользящего временного окна добавляет качественно новые возможности в структуру системы мониторинга на этапе регистрации ЭКС.

**Ключевые слова:** информационно-вероятностный подход, энтропия, неопределенность значений, моменты третьего и четвертого порядка, зубцы электрокардиосигнала.

**Abstract.** *Background.* The introduction of mobile information technologies has formed prerequisites for improving the algorithms of medical diagnostic equipment. The subject of the study are methods for determining diagnostic significant intervals of the electrocardiogram (ECS). The aim of the paper is to investigate the possibilities of information-and-probabilistic technologies for the analysis of the ECS. *Materials and methods.* The paper deals with a qualitatively new approach to the processing and analysis of ECS, accord-

ing to which the study of the ECS intervals is based on a change in the activity of cardiomyocytes depending on the phase of development of the action potential and is based on the dependence of both the derivatives of the ECS change and on the information entropy of the ECS values on the thermodynamic activity of the heart tissues also. *Results.* On the basis of probabilistic and information uncertainty of ECS values, *QRS*-complex detectors were constructed, which contain additional possibilities for estimating the position of the maximum *R* of the tooth and, as a consequence, determining the *RR*-intervals of the ECS that is necessary for determining the heart rate and for examining the variability of the heart rhythm. The realization of the sum operator of the second and third derivatives in the construction of the *QRS*-complex detectors and ECS wave is based on the control of the time dependence of the sum for central moments of the third and fourth order central moments calculated for the selection of the values of the ECS in the sliding window. The non-linear dependence of high-order moments on the differences between the values in the sliding window provides a reliable detection of the *QRS*-complex and ECS wave. *Conclusions.* Universal tools were developed to detect different epochs of the cardio cycle thanks to joint studies of information and probabilistic properties of the electrocardiogram. The use of connexion for of information and probabilistic uncertainties in the values of the EKS of the sliding time window adds qualitatively new possibilities to the structure of the monitoring system at the stage of registration of the EKS.

**Key words:** information-probabilistic approach, entropy, uncertainty of values, moments of the third and fourth order, wave of the electric cardiac signal.

### ***Введение***

Современная медицина стала одной из передовых отраслей научной и прикладной деятельности, важнейшей задачей которой является своевременная профилактика и снижение рисков заболеваний на основе разработки новых эффективных методов ранней диагностики начала развития патологий. Внедрение в клиническую практику новых информационных технологий сформировало предпосылки для перехода медицинской диагностики на новый технологический уровень и предопределило развитие нового поколения аппаратуры мониторингового контроля. Современные мобильные приложения, включенные в сеть телеметрического мониторинга [1–4], обладают возможностью предварительной обработки электрокардиографической информации с целью выявления временных интервалов кардиоциклов и ее визуализации, удобной для восприятия медицинским специалистом.

В последнее десятилетие наблюдается устойчивая тенденция использования микрокомпьютерных средств обработки ЭКС, отличающихся эффективностью при построении алгоритмов автономного анализа [5–7]. Такие системы разрабатываются для того, чтобы проводить процесс обработки ЭКС в 12 отведениях при проведении Холтеровского мониторинга в реальном масштабе времени. Для этих целей необходимо детектирование *QRS*-комплекса и зубцов ЭКС в реальном времени. Такие системы мониторинга содержат алгоритмы записи интервала аномальной ЭКГ и их передачи в медицинское учреждение. Несмотря на технологические возможности обработки результатов, существующие системы строятся на основе алгоритмических подходов, направленных на применение детерминированных моделей сердца и структурного анализа на основе использования фильтров. Сложная внут-

ренинга структура биологического объекта предполагает случайное изменение контролируемых параметров и сигналов, обусловленное наличием хаоса в его организации. Автоволновые процессы распространения трансмембранного потенциала действия в проводящей системе сердца и системе распространения возбуждения относятся к хаотическим процессам, так как полностью определены организацией внутренней структуры тканей сердца. В современной литературе вероятностные и информационные свойства сердца как динамической системы исследованы, во-первых, для взаимосвязи ритма сердца с функциональным состоянием организма [8]; во-вторых, при организации ярусной технологии структурно-топологического анализа динамики ритма сердца [9]; в-третьих, в методе варибельности ритма сердца [10]. В условиях хаотических изменений контролируемого объекта особое значение приобретает объединение вероятностной и информационной концепций для построения систем контроля и мониторинга состояния сердца. В статье автором рассмотрены некоторые решения, иллюстрирующие возможности применения меры энтропийно-параметрического потенциала для построения обнаружителя зубцов ЭКС. Во время исследований использована база данных ГБУЗ «Клиническая больница № 6 имени Г.А. Захарьина», созданная на основе результатов обследования пациентов, содержащая 100 регистраций электрокардиограмм здоровых пациентов.

#### ***Классический подход обнаружения R-зубца***

Основные технологические приемы, необходимые для построения алгоритмов обнаружителей *QRS*-комплексов для ЭКС, рассмотрены в работах [11–14]: технологии фильтров, технологии дифференцирования, технологии машинных шаблонов, алгоритм Пана – Томпкинса, корреляционные технологии.

В литературе при реализации обнаружителя *QRS*-комплекса в реальном времени применяют различные модификации алгоритма Пана – Томпкинса, технологическая последовательность обработки которого приведена на рис. 1. Алгоритм состоит из следующей последовательности: аналого-цифрового преобразования (АЦП) ЭКС, фильтра нижних частот (ФНЧ), фильтра высоких частот (ФВЧ), оператора производной (ОП), нелинейного преобразователя (НП), интегратора скользящего окна (ИСО), порогового детектора (ПД) и алгоритма поиска (АП).

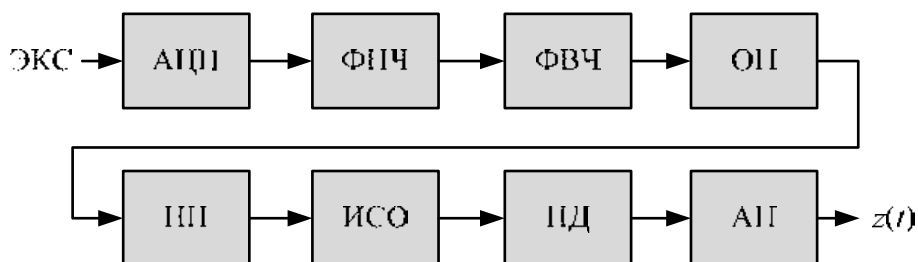


Рис. 1. Последовательность обработки Пана – Томпкинса

Для обнаружения *QRS*-комплекса в реальном времени необходимы процедуры фильтрации низкочастотных и высокочастотных помех. Оператор производной включен в алгоритм для подавления низкочастотных компонент *P*- и *T*-зубцов. Нелинейный преобразователь усиливает большие разности, характерные для *QRS*-комплекса и для подавления малых разностей *P*- и *T*-зубцов посредством возведения в квадрат. Для сглаживания пиков в алгоритм включен интегратор типа скользящего окна.

В настоящее время широко распространены алгоритмы, основанные на цифровом дифференцировании сигнала [10–13, 15]. Операция взятия производной усиливает быстрое изменение сигнала *QRS*-комплекса и подавляет медленные изменения *P*- и *T*-зубцов. Недостаток метода производных состоит в весьма высокой чувствительности производных к высокочастотному шуму, поэтому для применения этого метода необходимо существенное сглаживание сигнала. Применение низкочастотных фильтров для сглаживания сигнала или фильтров высокой частоты для стабилизации изoeлектрической линии вносит существенные искажения в форму биосигналов и влияет на их диагностические свойства [16–18]. Фильтрация ЭКС влияет на амплитуды, длительности и смещение интервалов ЭКС, поэтому в последнее время при проведении диагностического анализа ЭКС рекомендуется учитывать состав фильтров, включенных при регистрации сигнала. В связи с тем, что применение низкочастотных фильтров для фильтрации помех сильно искажает ЭКС, использование разностных операторов производной при цифровой обработке сигнала ограничено нахождением второй производной.

Снизить влияние шума при использовании операторов производных удается за счет применения для построения операторов производных отношений статистической и информационной неопределенности ограниченного количества  $N$  отсчетов выборки скользящего окна к его длительности, равного произведению количества  $N$  на время получения одного отсчета  $\Delta t$ . Подобный прием был использован для построения фазовых траекторий [19].

### ***Термодинамическое происхождение эпох электрокардиосигнала***

Биофизические сигналы содержат признаки физиологических событий. Анализ природы события при мониторинге наблюдения объекта позволяет «идентифицировать дискретные эпохи рассматриваемого биомедицинского сигнала и соотнести с событиями в соответствующих физиологических процессах» [7]. Кардицикл ЭКС отображается в виде последовательности волн *QRS*-комплексов и *P*-, *T*-зубцов с которыми связаны следующие эпохи.

Эпоха *P*-зубца соответствует сокращению предсердия, инициируемому импульсом из синоатриального узла. Так как ткани предсердия не имеют специальных проводящих нервов и импульсы возбуждения проводятся непосредственно сокращаемыми тканями, сокращение мышц предсердия происходит в виде медленного сжатия длительностью приблизительно 80 мс. Эпохе *P*-зубца соответствует зона ЭКС с амплитудой примерно 0,1–0,2 мВ.

Эпоха *QRS*-комплекса соответствует событию деполяризации миокарда и начала сокращения желудочков. Высокая скорость и одновременность деполяризации миокарда обеспечены стимулирующим действием специальной системы волокон Пуркинье, что приводит к резкому и высокому *QRS*-комплексу с длительностью и амплитудой приблизительно 80–100 мс и 1 мВ соответственно. Быстрая стимуляция мышц желудочков, начинающаяся с верхушки сердца, необходима для одновременного сокращения всей мускулатуры желудочков.

Эпоха *T*-зубца относится к последней фазе потенциала действия, во время которой происходит реполяризация тканей миокарда. Так как длительность деполяризации в различных точках миокарда отличается более чем в 2 раза, реполяризация тканей происходит не одновременно. По этой причине *T*-зубец имеет большую продолжительность и малое амплитудное значение порядка 120–160 мс и 0,1–0,3 мВ соответственно.

Свойства эпох ЭКС приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства эпох ЭКС

Эпоха ЭКС	Амплитуда, мВ	Длительность, мс	Скорость изменения ЭКС, мВ/с
<i>P</i> -зубца	0,1 ... 0,2	80	1,3 – 2,5
<i>QRS</i> -комплекса	1	80–100	10 ... 12,5
<i>T</i> -зубца	0,1 ... 0,3	120–160	0,6 ... 2,5

Эпохи ЭКС (*QRS*-комплексов и *P*- и *T*-зубцов) отражают различные события, связанные с распространением трансмембранного потенциала действия в тканях сердца, происходящих под действием термодинамических форм энергии. Очевидно, что для разработки эффективных методов обнаружения событий при обработке сигнала следует учитывать взаимосвязь изменений ЭКС на поверхности торса с электрической активностью при распространении трансмембранного потенциала действия в тканях сердца. При распространении трансмембранного потенциала действия в тканях сердца происходит изменение энергетических состояний отдельных ионов при открытии и закрытии каналов, что обуславливает продукцию термодинамической энтропии в тканях сердца. Изменение концентраций ионов при распространении трансмембранного потенциала действия обуславливает генерацию электрохимического потенциала  $\bar{\mu}$  и, как следствие, распространение ионного электрического тока в проводящей среде организма. Термодинамическое происхождение энтропии контролируемого электрического потенциала отведения объединяет термодинамические и информационные процессы при обработке ЭКС. Открытие и закрытие ионных каналов приводит к отклонению от стационарного состояния и усилению электрической активности сердца. Отклонение от стационарного состояния отражается в увеличении неопределенности выборки значений скользящего окна, что можно выгодно использовать для построения

алгоритмов определения зубцов ЭКС. Дело в том, что при детерминированной смене событий распространения потенциала действия по тканям проводящей системы сердца происходит изменение электрической активности сердца, которая имеет термодинамическое происхождение. Более подробно взаимосвязь термодинамических процессов в тканях сердца и информации ЭКС рассмотрена в работе [11].

Так как ЭКС отражает электрическую активность сердца, то при смене эпох ЭКС происходит характерное изменение интенсивности термодинамических процессов в тканях сердца. Из табл. 1 следует, что для эпохи *QRS*-комплекса средняя скорость изменения значений ЭКС приблизительно в 5–10 раз превосходит скорости изменений значений для эпох *P*- и *T*-зубцов. При рассмотрении материала автор полагает, что существует взаимосвязь между продукцией термодинамической энтропии при распространении потенциала действия в проводящей системе сердца и интенсивностью изменений значений ЭКС во времени. Такой подход позволил использовать одинаковую математическую форму, построенную на основе информационной энтропии и моментов вероятности, для обнаружения *QRS*-комплексов, *P*- и *T*-зубцов.

#### ***Информационный и вероятностный анализ при выделении временных интервалов ЭКС***

При разработке систем Холтеровского мониторинга ценность алгоритмов обработки записи ЭКС с помощью дешифратора определяется точностью реализации основных функций автоматического анализа ЭКС. К основным процедурам анализа относятся процедуры обнаружения, распознавания и классификации *QRS*-комплексов [1, 20]. Обнаружение *QRS*-комплексов и определение положения максимума *R*-зубца необходимы для оценки функционального состояния организма на основе метода variability ритма сердца [9, 10].

При реализации функций обнаружения сегментов ЭКС современные алгоритмы ориентированы на анализ морфологии сигналов, для которых необходимы выполнение процедуры предварительной фильтрации низкочастотных и высокочастотных помех, устранение тренда изолинии и исключение артефактов [11, 12, 14, 15].

Автором работы предложен качественно новый информационно-вероятностный подход обработки и анализа ЭКС, согласно которому обнаружение зубцов ЭКС основано на изменении активности кардиомиоцитов в зависимости от фазы развития потенциала действия. Так как диффузионная составляющая электрохимического потенциала является электродвижущей силой ионных токов в биологической среде и создает потенциал на поверхности торса, то увеличение термодинамической активности тканей сердца при деполяризации и первой фазе реполяризации миокарда увеличивает изменение значений ЭКС. Классически для обнаружения *QRS*-комплексов на основе увеличения скорости изменения ЭКС используются операторы первой и вто-

рой производных, недостаток которых состоит в усилении высокочастотных составляющих помех.

### *Энтропийно-параметрический подход к обнаружению QRS-комплекса*

Очевидно, что появление активности тканей сердца меняет распределение значений ЭКС в выборке скользящего временного окна. Вероятностные и энтропийные характеристики выборок значений скользящего окна содержат информацию об интенсивности изменения потенциала отведения во времени. Изменение неопределенности потенциала отведения в выборке значений ЭКС скользящего окна, отнесенное к длительности, имеет свойство оператора первой производной ЭКС.

Качественное отличие вероятностных и информационных оценок неопределенности выборки значений ЭКС от разницы между двумя рядом расположенными значениями ЭКС в том, что такие оценки учитывают характер вероятностного распределения значений потенциала для всей выборки скользящего окна. В статистике для оценки неопределенности выборки значений используют среднее квадратическое отклонение, рассчитываемое для значений скользящего окна с помощью формулы

$$\sigma(t_i) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N (u_{(i-N)/(2+j)} - u_{cp}(t_i))^2}, \quad (1)$$

где  $u_i$  – значение ЭКС в  $i$ -й момент времени;  $N$  – количество значений в выборке ЭКС скользящего окна;  $j$  – порядковый номер ЭКС в выборке скользящего окна;  $u_{cp}(t_i)$  – среднее значение ЭКС выборки скользящего окна.

Информационная неопределенность ЭКС проводится на основе оценки энтропии выборки значений ЭКС скользящего окна, определяемой как математическое ожидание логарифма функции плотности вероятности. Для расчета энтропии в скользящем окне используется формула

$$H(t_i) = - \sum_{s=1}^m \left( \frac{n_{si}}{N} \ln \left( \frac{n_{si}}{N \cdot \Delta u_{\Gamma i}} \right) \right), \quad (2)$$

где  $m$  – количество интервалов группирования данных,  $m = \lceil \sqrt{N} \rceil$ ;  $n_{si}$  – количество результатов, попавших в  $s$ -й интервал группирования данных для  $i$ -го момента времени;  $\Delta u_{\Gamma i}$  – ширина интервала группирования результатов.

При построении обнаружителя и предварительного выделения QRS-комплекса применено свойство оператора первой производной ЭКС, которым обладают вероятностная и информационная неопределенности потенциала отведения ЭКС скользящего окна. В качестве оператора первой производной использовано отношение энтропийно-параметрического потенциала к интер-

валу временного окна. Формула для расчета энтропийно-параметрического потенциала имеет вид

$$\Delta_{\text{эп}}(t_i) = \sqrt{\sigma^2(t_i) + 0,25 \exp(2H(t_i))}. \quad (3)$$

Характерный пример обнаружения  $R$ -зубца непосредственно по выборке значений ЭКС при использовании вероятностной и информационной неопределенностей значений ЭКС в скользящем окне показан на рис. 2. Такой обнаружитель реализует операцию взятия первой производной над значениями временного ряда ЭКС, для оценки которой используется отношение энтропийно-параметрического потенциала, рассчитанного по формуле (3), к длительности скользящего окна. Особенность поведения энтропийно-параметрического потенциала состоит в том, что его изменение в области  $T$ - и  $P$ -зубцов превышает 10 % предел изменения в области  $R$ -зубца, что затрудняет выделение значений  $R$ -зубца при наличии высокой интенсивности помех сигнала и действия артефактов.

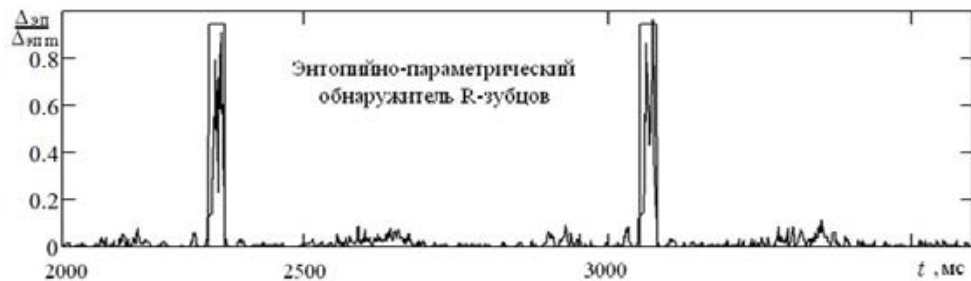


Рис. 2. Обнаружение  $R$ -зубца, построенное на вероятностной и информационной оценках неопределенности значений ЭКС в скользящем окне

Энтропийно-параметрический потенциал в скользящем окне показал высокую чувствительность для обнаружения  $T$ - и  $P$ -зубцов при анализе прошедшего предварительную обработку электрокардиосигнала. Среди характерных особенностей обнаружителя следует отметить его высокую чувствительность к воздействию артефактов, т.е. изменений сигнала при высокой активности организма.

Изменение энтропийно-параметрического потенциала  $\Delta_{\text{эп}}(t_i)$  для выборки значений скользящего окна в зависимости от времени  $t_i$  при обнаружении  $R$ -зубцов прошедшего предварительную обработку ЭКС показано на рис. 3. Там же для сравнения даны изменения энтропийной  $\Delta_s(t_i)$  и параметрической  $\sigma(t_i)$  составляющих потенциала. Точки минимума энтропийно-параметрического потенциала между двумя максимумами соответствуют положению максимумов  $R$ -зубцов, что делает возможным оценку  $RR$ -интервалов на основе вероятностной и информационной обработки значений потенциалов ЭКС скользящего временного окна.



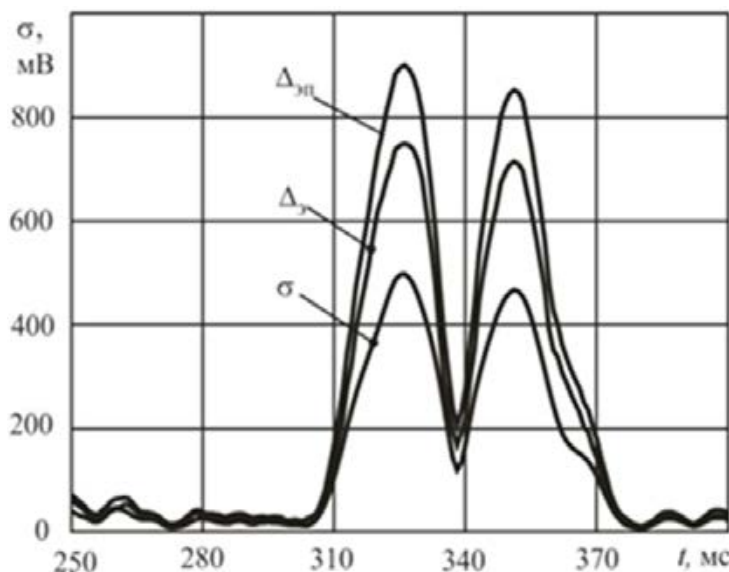


Рис. 3. Изменение оператора первой производной в скользящем окне при обнаружении *QRS*-комплекса

Таким образом, обнаружители *QRS*-комплекса, построенные на вероятностной и информационной неопределенностях значений ЭКС, реализуют операцию первой производной и содержат возможность оценки положения максимума *R*-зубца – важного диагностического показателя, необходимого для определения частоты сердечных сокращений и для исследования вариабельности сердечного ритма [20–22].

#### **Обнаружитель зубцов ЭКС на основе моментов высокого порядка**

Другой эффективный подход анализа кардиографической информации основан на оценке центральных моментов высокого порядка для значений ЭКС скользящего окна. Методика аппроксимации распределения выборки значений ЭКС скользящего окна с помощью статистического степенного ряда приведена в работе [23]. Формула для расчета *j*-го значения  $u_j$  выборки ЭКС, сортированной в порядке возрастания, имеет вид

$$u_j = \text{Me}(U) + \sigma(U) \left( \frac{j}{N} - 0,5 \right) \left( 1 + \sum_{s=3}^n \left( \frac{\mu_s(U)}{(\mu_2(U))^s} \frac{(0,5N - j)^{s-2}}{(Nk)^{s-2} (s-1)!} \right) \right), \quad (4)$$

где  $\text{Me}(U)$ ,  $\sigma(U)$  и  $\mu_s(U)$  – медиана, среднее квадратическое отклонение и моменты *s*-го порядка, рассчитанные для выборки *U* случайных значений ЭКГ скользящего окна; *k* – коэффициент вариации,  $k = [1 \dots 3]$ .

Из формулы (4) следует, что для сортированной выборки значений коэффициенты разложения аппроксимаций по степенным составляющим имеют свойства производных *s*-го порядка. Тогда коэффициенты разложения аппроксимаций можно рассматривать как операторы производных *s*-го порядка, найденных на основе центральных моментов выборки значений ЭКС для

скользящего временного окна. Применение операторов производных  $s$ -го порядка открыло возможность модифицировать известные методы выделения  $QRS$ -комплекса, применяемые в традиционном алгоритмическом анализе ЭКС, что позволило разработать новые способы обнаружения и предварительного выделения  $QRS$ -комплекса посредством вероятностного и информационного анализа выборки значений скользящего окна.

Обнаружитель  $QRS$ -комплекса, построенный на контроле временной зависимости суммы центральных моментов третьего  $\mu_3(t_i)$  и четвертого  $\mu_4(t_i)$  порядка выборки значений ЭКС в скользящем окне, представляет собой реализацию оператора суммы второй и третьей производных. В этом случае контролируемый параметр  $X_\mu(t_i)$  для выборки скользящего окна в текущий момент времени рассчитывается по формуле

$$X_\mu(t_i) = \frac{\mu_3(t_i)}{\mu_{3\max}} + \frac{\mu_4(t_i)}{\mu_{4\max}}, \quad (5)$$

где  $\mu_{3\max}$  и  $\mu_{4\max}$  – максимальные значения третьего и четвертого центральных моментов, рассчитанные для интервала времени наблюдения ЭКС.

Временной интервал для  $QRS$ -комплекса определен из условия, что контролируемая величина  $X_\mu(t_i)$  больше порогового значения  $X_{\mu\text{п}}$ :

$$|X_\mu(t_i)| > X_{\mu\text{п}}. \quad (6)$$

Пример работы обнаружителя  $QRS$ -комплекса показан на рис. 4.

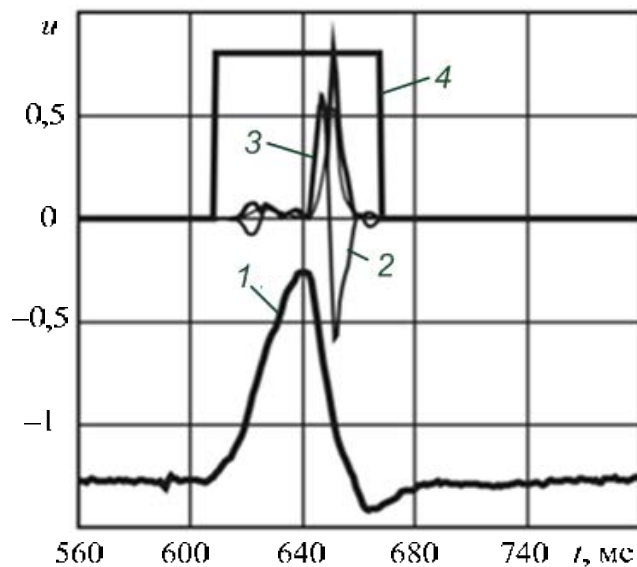


Рис. 4. Изменение операторов суммы производных второго и третьего порядка в скользящем окне: 1 –  $QRS$ -комплекс ЭКС; 2 и 3 – центральные моменты третьего и четвертого порядка, приведенные к их максимальным значениям; 4 – справедливость неравенства (6)

Пороговое значение контролируемого параметра  $X_{\mu \min}$  для обнаружения  $QRS$ -комплекса при достоверности обнаружения 0,95 устанавливается на уровне  $10^{-1}$ – $10^{-2}$ . Высокая достоверность обнаружения  $QRS$ -комплекса достигается благодаря нелинейной зависимости моментов высокого порядка от максимальной разницы между текущим  $u(t_j)$  и средним  $\bar{u}(t_i)$  значениями в скользящем окне.

Различие активности кардиомиоцитов во время деполяризации и реполяризации отражено в разности значений скользящего окна  $QRS$ -комплекса и разности значений  $T$ - и  $P$ -зубцов. Пример обнаружения  $QRS$ -комплекса,  $P$ - и  $T$ -зубцов дан на рис. 5.

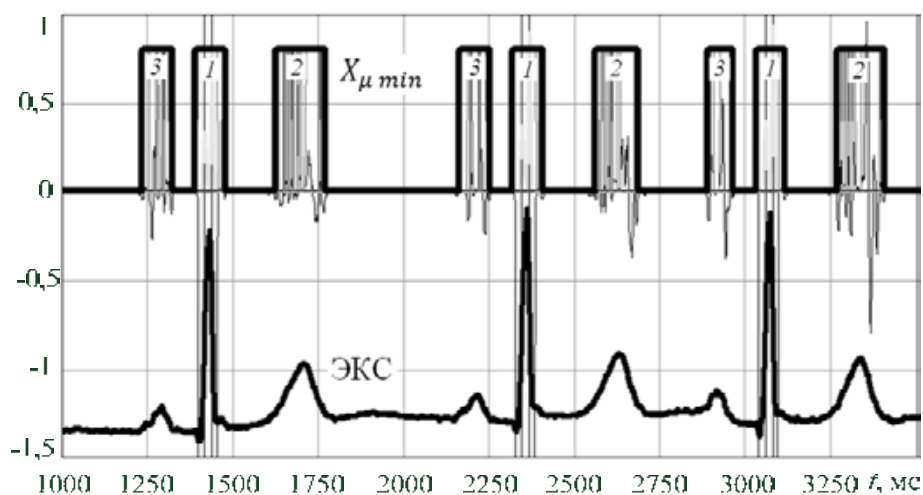


Рис. 5. Обнаружение  $QRS$ -комплекса,  $P$ - и  $T$ -зубцов:  
1, 2 и 3 –  $QRS$ -комплекс,  $T$ - и  $P$ -зубцы соответственно

Если разница значений  $QRS$ -комплекса в 4–10 раз больше разницы значений  $T$ - и  $P$ -зубцов, то отношение контролируемого параметра  $X_{\mu}(t)$   $X_{\mu}(t_i)$  во временных интервалах  $QRS$ -комплекса и  $T$ - и  $P$ -зубцов отличается на 3–6 порядков. В связи с тем, что разницы значений, обусловленные высокочастотными и низкочастотными помехами, в разы отличаются от разницы значений зубцов, применение контролируемого параметра  $X_{\mu}(t)$  в скользящем временном окне делает возможным обнаружение зубцов ЭКС за счет установления порогового значения на уровне  $10^{-6}$ – $10^{-4}$  для  $P$ -зубцов и  $10^{-4}$ – $10^{-2}$  для  $T$ -зубцов. Так как критерии  $X_{\mu \min}$  для  $QRS$ -комплекса и  $T$ - и  $P$ -зубцов отличаются на 2–3 порядка, применение критерия позволяет однозначно различить обнаруженные сегменты ЭКС.

### **Технология энтропийно-параметрического обнаружения ЭКС**

Особенность действия определителей  $R$ -зубца состоит в возможности оценки положения максимума  $R$ -зубца по характерному минимуму между двумя максимумами. Нелинейное увеличение разниц сигнала делает возмож-

ным обнаружение сигнала непосредственно по исходной выборке сигнала. Обнаружение *R*-зубца отражается на изменении суммы моментов второго и третьего порядка в форме увеличения интенсивности сигнала в области *QRS*-комплекса.

Применение энтропийно-параметрического потенциала позволило изменить технологический процесс обнаружения *QRS*-комплекса и зубцов ЭКС. На рис. 6 приведена технологическая последовательность обработки при использовании энтропийно-параметрических способов обнаружения ЭКС.

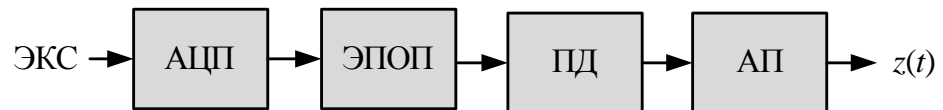


Рис. 6. Последовательность при использовании энтропийно-параметрических способов обнаружения зубцов ЭКС (ЭПОП – энтропийно-параметрический оператор)

Характерный пример энтропийно-параметрического обнаружения *R*-зубца, основанный на изменении суммы центральных моментов третьего и четвертого порядка в скользящем окне, содержащем 17 значений, показан на рис. 7.

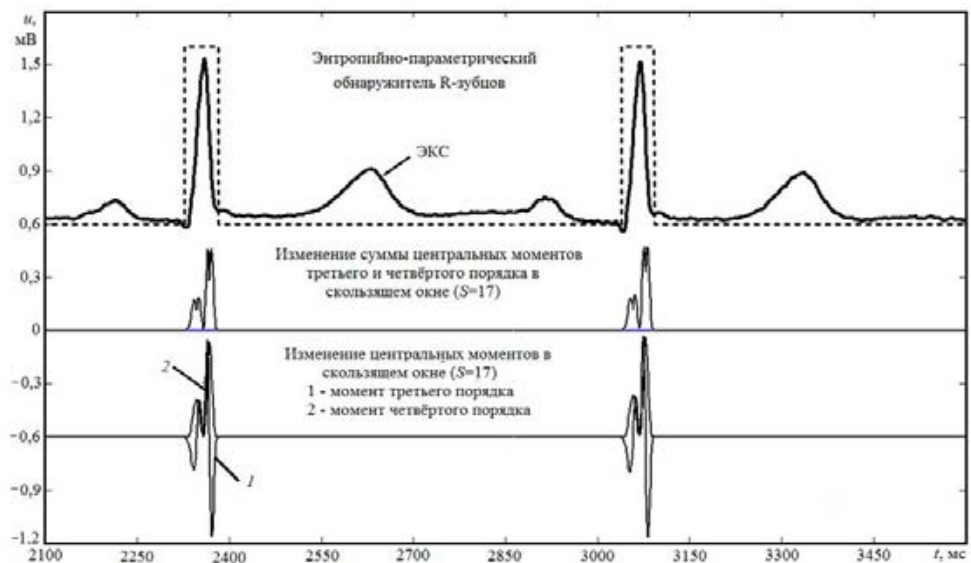


Рис. 7. Энтропийно-параметрическое обнаружение *R*-зубца

После выделения значений суммы моментов для области *QRS*-комплекса на уровне 1 % от их максимального значения выделенные значения для суммы моментов принимают равными нулю. Полученная выборка значений анализируется на новом уровне для анализа *T*- и *P*-зубцов. Пример обнаружения положения *T*- и *P*-зубцов ЭКС показан на рис. 8. Такой подход

делает возможным обнаружение значений в области  $R$ -зубца, принадлежащих  $QRS$ -комплексу.

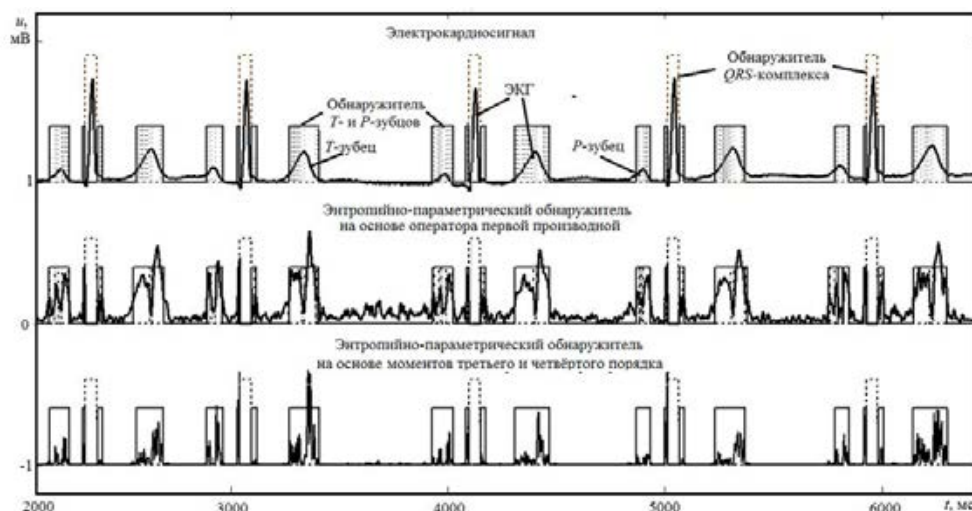


Рис. 8. Энтропийно-параметрическое обнаружение  $T$ - и  $P$ -зубцов

Для построения процедуры оценки первой производной по значениям выборки скользящего окна относительно момента времени, соответствующего положению центра окна, используется отношение, рассчитанное для выборки значений скользящего окна, энтропийно-параметрического потенциала к произведению числа значений выборки на процедурное время получения одного значения. Следует отметить, что при работе обнаружителя, реализующего оценку первой производной, сохраняется действие помехи, накладываемой на сигнал, на уровне 10 % от максимального энтропийно-параметрического потенциала, рассчитанного для  $T$ - и  $P$ -зубцов. Высокое действие помехи на энтропийно-параметрический потенциал затрудняет обнаружение зубцов непосредственно по значениям ЭКС и усиливает влияние артефактов.

Процедура оценки суммы второй и третьей производных по выборке значений скользящего окна реализована в виде отношения суммы центральных моментов третьего и четвертого порядка к произведению количества значений в выборке на процедурное время получения одного результата. Для получения соразмерности моментов третьего и четвертого порядка при построении обнаружителя используются приведенные моменты к их максимальным значениям на интервале времени в несколько кардиоциклов (1–5 циклов). Высокая чувствительность обнаружения  $T$ - и  $P$ -зубцов при использовании суммы моментов третьего и четвертого порядка достигается благодаря нелинейному преобразованию разностей значений в области зубцов относительно разности помех в  $ST$ - и  $TP$ -интервалах. Характерная оценка моментов для разниц соседних значений в  $ST$ - и  $TP$ -интервалах на 2–3 порядка меньше по сравнению с разностями соседних значений для эпох

*P*- и *T*-зубцов. Порог детектора при определении *P*- и *T*-зубцов с помощью суммы моментов второго и третьего порядка устанавливается на уровне 0,01–0,1 % от максимального значения суммы моментов в интервале 3–5 кардиоциклов, которые приходятся на интервалы *R*-зубцов. При обнаружении *P*- и *T*-зубцов происходит дополнительное определение области интенсивности *Q*- и *S*-зубцов.

### **Обсуждение результатов**

В целях улучшения определения диагностически значимых интервалов ЭКС на основе информационно-статистического анализа были разработаны два способа обнаружения *QRS*-комплекса: *первый способ* реализует оценку неопределенности значений выборки скользящего окна, *второй способ* построен на сумме центральных моментов третьего и четвертого порядка. Применение центрированных статистических оценок, рассчитанных на основе всей выборки скользящего окна, обеспечивает нечувствительность обнаружителей к низкочастотным помехам и дрейфу ЭКС, так как возможность оценки контролируемых параметров непосредственно по выборке значений ЭКС снижает воздействие высокочастотных помех.

При сравнении обнаружителей *QRS*-комплекса обнаружитель, построенный на основе оператора первой производной, реализует определение максимума положения *R*-зубца. Такой обнаружитель удобно использовать для определения частоты сердечных сокращений по длительности *RR*-интервалов и для исследования variability сердечного ритма. Реализация обнаружителей *QRS*-комплекса и *P-T*-зубцов на основе энтропийно-параметрического потенциала является гибким инструментом, удобным на этапе диалогового анализа ЭКС. При реализации контроля параметра на основе суммы третьего и четвертого моментов обнаружители для выделения *QRS* стабильны при реализации автоматического анализа ЭКС.

Нелинейные свойства обнаружителя обеспечивают преобразование разницы приращений сигнала более чем на два порядка. Это означает, что при установлении порогового значения  $X_{\text{пп}}$  на уровне 1 % от максимального значения контролируемого параметра  $X_{\mu}(t_i)$  для эпох *T*- и *P*-зубцов параметр  $X_{\mu}(t_i)$  будет меньше на 2–3 порядка:  $\lg(\Delta X_3) > 2$ . Так как продукция энтропии для помех сигнала меньше, чем продукция энтропии, вызванная электрической активностью сердца, то значение параметра  $X_{\mu}(t_i)$  от действия помех также на несколько порядков меньше контролируемой величины. Нелинейные свойства энтропийно-параметрических обнаружителей иллюстрирует рис. 9, где параметр  $\Delta X$  задан в логарифмических координатах.

Для обнаружителей на основе первой производной порог устанавливается на уровне характерных изменений *QRS*-комплекса, т.е. разница между порогом  $X_{\text{пп}}$  и значениями параметра  $X_{\mu}$  эпохи *P-T*-зубцов отличается менее чем на порядок:  $\lg(\Delta X_1) < 0,5$ .

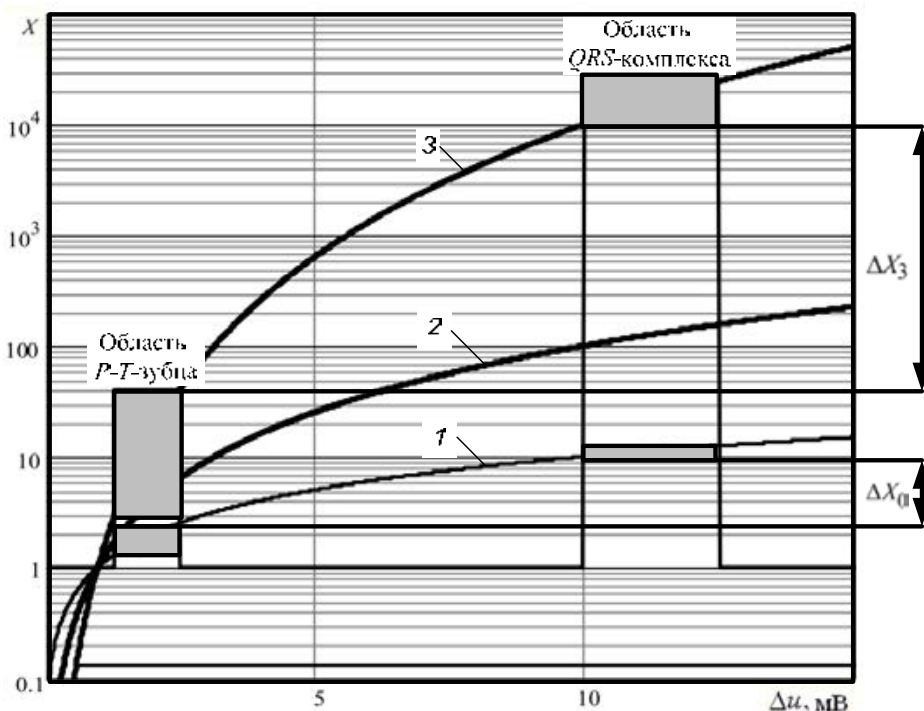


Рис. 9. Нелинейные свойства энтропийно-параметрических обнаружителей:  
 1 и 2 – на основе оператора первой производной; 3 – на основе моментов  
 третьего и четвертого порядка

Таким образом, нелинейные свойства обнаружителя *QRS*-комплекса, построенного на контроле временной зависимости суммы центральных моментов третьего и четвертого порядка, обеспечивают высокую эффективность обнаружения *QRS*-комплекса, близкую к 100 % без предварительной обработки сигнала. Особенность энтропийно-параметрических обнаружителей состоит в том, что математическая форма для обнаружения *QRS*-комплекса и *P-T*-зубцов не меняется, в отличие от существующих обнаружителей, имеющих близкие значения эффективности при обнаружении *QRS*-комплексов.

В связи с тем, что интенсивность изменения состояния электрической системы сердца при реполяризации миокарда сопоставима с интенсивностью артефактов двигательной активности и наводимыми помехами в автоматическом режиме, возможно только обнаружение *T*- и *P*-зубцов с помощью оператора суммы второй и третьей производных. Для повышения достоверности выделения и последующего анализа зубцов необходима предварительная обработка сигнала, предусматривающая подавление помех и исключение артефактов.

### Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

В настоящее время объединение вероятностного и информационного направления развития методов обработки ЭКС в мобильных системах мони-

торинга формирует тенденцию перехода средств медицинской диагностики на новый качественный уровень.

Основные свойства обнаружителей *QRS*-комплекса и зубцов ЭКС обусловлены термодинамической взаимосвязью между электрической активностью тканей сердца и неопределенностью выборки значений ЭКС скользящего временного окна. Свойства обнаружителей заключаются в увеличении энтропийно-параметрического потенциала во временных интервалах зубцов ЭКС.

При реализации оператора суммы второй и третьей производных ЭКС на основе суммирования центральных моментов третьего и четвертого порядка для значений скользящего окна нелинейные свойства оператора суммы производных позволяют достоверно обнаруживать *QRS*-комплекс, *T*- и *P*-зубцы.

Вероятностный анализ неупорядоченности значений выборки ЭКС с целью обнаружения временных интервалов *QRS*-комплекса, *T*-зубца, *RR*- и *ST*-интервалов проводится непосредственно по зарегистрированным выборочным данным, для которых информация не искажена в результате предварительной обработки данных с целью подавления помех. Такой подход позволяет изменить структуру системы мониторинга, добавив качественно новые возможности как на этапе регистрации ЭКС, так и на этапе автоматического анализа с помощью дешифратора.

#### **Библиографический список**

1. Национальные Российские рекомендации по применению методики Холтеровского мониторирования в клинической практике // Российский кардиологический журнал. – 2014. – № 2 (106). – С. 6–71.
2. Пат. 2540528 Российская Федерация, МПК А61В5/0402. Устройство для регистрации электрокардиосигнала в условиях свободной двигательной активности / Бодин О. Н., Кривоногов Л. Ю., Петровский М. А., Рахматуллин Ф. К., Иванчуков А. Г., Бальзанникова Е. А., Папшев Д. В. ; заявл. 16.07.2013 ; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4
3. A new telemonitoring system intended for chronic heart failure patients using mobile telephone technology / S. Winkler, M. Schieber, S. Lücke, P. Heinze, T. Schweizer, D. Wegertseder, M. Scherf, H. Nettelau, S. Henka, M. Braeklein, S. D. Anker, F. Koehler // Feasibility study. Int J Cardiol. – 2011. – Vol. 153, № 1. – P. 55–58.
4. Telemonitoring with implantable electronic devices in young patients with congenital heart diseases / P. A. Zartner, N. Toussaint-Goetz, J. Photiadis, W. Wiebe, M. B. Schneider // Europace. – 2012. – Feb. 2.
5. Бодин, О. Н. Методы и средства обработки кардиографической информации : моногр. / О. Н. Бодин. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2008. – 350 с.
6. Бодин, О. Н. Концепция диагностики состояния сердца в условиях свободной активности / О. Н. Бодин, А. Г. Иванчуков, В. Г. Полосин, М. А. Петровский // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – URL: [www.science-education.ru/120-16008](http://www.science-education.ru/120-16008) (дата обращения: 12.09.2015).
7. Клебнева, А. Е. Разработка алгоритмов обработки электрокардиосигналов для беспроводных систем мониторинга важнейших показателей жизнедеятельности / А. Е. Клебнева, Л. Ю. Кривоногов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2011. – № 1. – С. 198–201.
8. Пат. 2323681 Российская Федерация, МПК А61В5/02; А61В5/0452; А61В5/0482. Способ коррекции функционального состояния человека / Кузьмин А. А., Филист С. А., Пронин Т. В. ; заявл. 29.05.2006 ; опубл. 29.05.2006.



9. Кузнецов, А. А. Измерительные характеристики и свойства информационной энтропии диаграмм ритма сердца / А. А. Кузнецов // Измерительная техника. – 2011. – № 7. – С. 65–70.
10. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use // Europ. Heart J. – 1996. – Vol. 17. – P. 354–381.
11. Рангайян, Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р. М. Рангайян. – М. : Физматлит, 2007. – 440 с.
12. Clifford, G. D. Signal processing methods for heart rate variability analysis : PhD Thesis michaelmas Term / G. D. Clifford. – 2002. – 244 p. – URL: <http://web.mit.edu/~gari/www/papers/GDCliffordThesis.pdf>
13. Digital Signal Processing. C-Language Examples and Laboratory experiments for the IBM PC. ECG QRS Detection / ed. W. J. Tomkins. – New Jersey : Prentice Hall. Upper Saddle River, 2000. – 450 p.
14. Пат. 2410023 Российская Федерация. Способ выделения QRS-комплекса электрокардиосигнала / Бодин О. Н., Зайцева О. А. Кривоногов Л. Ю., Логинов Д. С., Рахматуллово Ф. К. ; заявл. 29.04.2009 ; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 1.
15. A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms. / G. S. Friesend, T. S. Jannett, M. A. Jadallan, S. L. Yates, S. R. Quint, H. T. Nagle // IEEE Trans. Biomed Eng. BME. – 1990. – Vol. 37, № 1. – P. 85–98.
16. Дроздов, Д. В. Влияние фильтрации на диагностические свойства биосигналов / Д. В. Дроздов // Функциональная диагностика. – 2011. – № 3. – С. 75–78.
17. Burri, H. Simulation of myocardial infarction by ECG filters / H. Burri, H. Sunthorn, D. Shah // Journal of Electro cardiology. – 2006. – Vol. 39, Is. 3. – P. 253–258.
18. Ning, X. ECG Enhancement and QRS Detection Based on Sparse Derivatives / X. Ning, I. W. Selesnick // Biomedical Signal Processing and Control. – 2013. – № 8. – P. 713–723.
19. Полосин, В. Г. Статистические методы построения фазовой траектории электрокардиосигнала / В. Г. Полосин, О. Н. Бодин, С. А. Балахонова, Р. В. Рябчиков // Фундаментальные исследования. – 2014. – Т. 12, № 9. – С. 2660–2665.
20. Рябыкина, Г. В. Холтеровское и бифункциональное мониторирование ЭКГ и артериального давления / Г. В. Рябыкина, А. В. Соболев. – М. : Медпрактика–М, 2016. – 352 с.
21. Рахматуллово, Ф. К. Чреспищеводная электрокардиостимуляция сердца и клиническая электрофизиология антиаритмических средств : моногр. / Ф. К. Рахматуллово. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – 112 с.
22. Полосин, В. Г. Способ статистического анализа электрокардиографической информации / В. Г. Полосин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 10. – С. 120–126.
23. Предсердная электромеханическая диссоциация при изолированной фибрилляции предсердий / Ф. К. Рахматуллово, О. В. Захарова, А. Ф. Рахматуллово, С. А. Пчелинцева, А. Ф. Рахматуллово, Е. Г. Зиновьева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2011. – № 4 (20). – С. 72–82.

---

***Полосин Виталий Германович***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра физики,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: [polosin-vitalij@yandex.ru](mailto:polosin-vitalij@yandex.ru)

***Polosin Vitaly Germanovich***

candidate of technical sciences,  
associate professor,  
sub-department of physics,  
Penza State University

---

УДК 53.082.9: 612.172.4

**Полосин, В. Г.**

**Особенности энтропийно-параметрического исследования временных интервалов электрокардиосигнала / В. Г. Полосин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 2 (22). – С. 237–254.**