

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 53.082.9: 612.172.4

DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-9

В. Г. Полосин

ЭНТРОПИЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ОБНАРУЖИТЕЛИ ЗУБЦОВ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА

V. G. Polosin

ENTROPY-PARAMETRIC DETECTORS OF WAVES OF AN ELECTROCARDIO SIGNAL

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Внедрение мобильных информационных технологий сформировало предпосылки для совершенствования алгоритмов медицинского диагностического оборудования. Предметом исследования является метод обнаружения диагностически значимых интервалов электрокардиосигнала (ЭКС). Цель работы состоит в исследовании возможностей обнаружения зубцов ЭКС, основанных на информационно-вероятностных технологиях анализа ЭКС. **Материалы и методы.** В работе рассмотрен 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 и зависимости как производных изменения ЭКС, так и информационной энтропии значений ЭКС от термодинамической активности тканей сердца. **Результаты.** Обнаружители QRS комплекса, построенные на вероятностной и информационной неопределенности значений ЭКС, обладают дополнительной возможностью оценки положения максимума R зубца и определения важного диагностического показателя – RR-интервалов ЭКС, необходимого для определения частоты сердечных сокращений и исследования variability 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 разниц между значениями в скользящем окне обеспечивает достоверное обнаружение QRS комплекса и зубцов ЭКС.

Abstract. Background. The introduction of mobile information technologies has formed prerequisites for improving the algorithms of medical diagnostic equipment. The subject of the study is the method of detection of diagnostic significant intervals of the electrocardiogram (ECS). The aim of the work is to investigate the possibilities of detecting EKS teeth based on information-probabilistic technologies of ECS analysis. **Materials and methods.** The paper considers a qualitatively new information-probabilistic approach of processing and analysis of ECS, according to which the detection of ECS waves is based on a change in the activity

of cardiomyocytes depending on the phase of development of the action potential. It is based on the change derivatives the ECS and on the information entropy of the sample of the values of ECS which are associated with the thermodynamics activity of the heart tissue. **Results.** Detector of QRS complex that constructed on probabilistic and information uncertainties of the ECS values has the additional ability to estimate the position of the maximum R wave and to determine an important diagnostic parameter – the RR intervals of the ECS that is necessary for determining the heart rate and for examining the variability of the heart rhythm. The implementation for the sum operator of the second and third derivatives in the construction detectors of the QRS complex and the ECS wave is based on the control of the times dependence of the sum for central moments of the third and fourth order 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 the ECS wave.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-вероятностный подход, энтропия, неопределенность значений, моменты третьего и четвертого порядка, зубцы электрокардиосигнала.

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

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 в использовании микрокомпьютерных средств обработки ЭКС, отличающихся эффективностью при построении алгоритмов автономного анализа [5, 6]. 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 мониторинговые системы 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 внутренняя 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 условиях *хаотических изменений контролируемого объекта особое значение приобретает объединение* вероятностной и информационной концепций для построения систем контроля и мониторинга состояния сердца. При формировании концепции предложен метод энтропийно-параметрической обработки ЭКС, на основе которого предложены решения прикладных задач. В статье автором рассмотрены некоторые решения, иллюстрирующие возможности применения меры энтропийно-параметрического потенциала для построения обнаружителя зубцов ЭКС.

Методы обнаружения R зубца

Основные технологические приемы, положенные для построения алгоритмов обнаружителей *QRS* комплексов для ЭКС, рассмотрены в работах [7–10]: технологии фильтров, технологии дифференцирования, технологии машинных шаблонов, алгоритм Пана – Томкинса, корреляционные технологии.

В литературе при реализации обнаружителя *QRS* комплекса в реальном времени применяют различные модификации алгоритма Пана – Томсона, технологическая последовательность обработки которого дана на рис. 1. Алгоритм состоит из следующей последовательности: аналого-цифрового преобразования ЭКС (АЦП), 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).

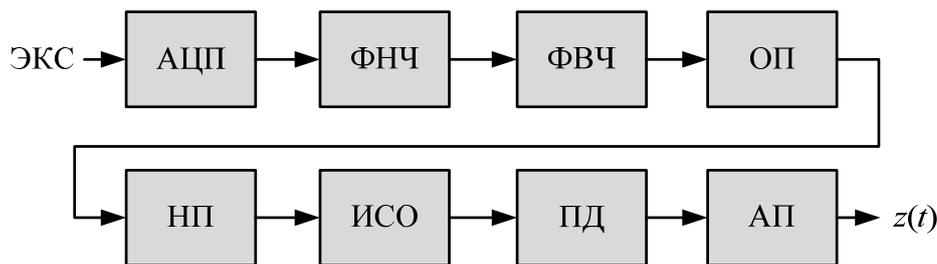


Рис. 1. Последовательность обработки Пана – Томсона

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 подавления малых разностей *P* и *T* комплексов 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 [7–9, 11]. 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 изоэлектрической линии вносят существенные искажения в форму биосигналов и влияют на их диагностические свойства [12, 13]. 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 искажают ЭКС, использование разностных операторов производной при цифровой обработке сигнала ограничено нахождением второй производной.

Снизить влияние шума при использовании операторов производных удастся 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 Δt . Подобный прием был использован для построения фазовых траекторий [14].

Термодинамика активности сердца

Изменение ЭКС на поверхности торса обусловлено электрической активностью при распространении трансмембранного потенциала действия в тканях сердца. Перемещение ионов в организме происходит под действием градиента электрохимического потенциала и вызывает продукцию термодинамической энтропии в тканях сердца, связанную с изменением

энергетических состояний отдельных ионов. Из условия, что при распространении потенциала действия в миокарде концентрация ионов внутриклеточной и межклеточной средах практически не меняется, стационарное состояние ионной системы миокарда устойчиво. Изменение концентраций ионов при распространении трансмембранного потенциала действия обуславливает генерацию электрохимического потенциала μ и, как следствие, распространение ионного электрического тока в проводящей среде организма. Термодинамическое происхождение энтропии контролируемого потенциала объединяет термодинамические и информационные процессы при обработке ЭКС. Открытие и закрытие ионных каналов приводит к отклонению от стационарного состояния. Усиление электрической активности сердца отражается в увеличении неопределенности выборки значений скользящего окна, что используется для определения зубцов ЭКС.

Информационный и вероятностный анализ при обнаружении 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, 15].

При реализации функций обнаружения сегментов ЭКС современные алгоритмы ориентированы на анализ формы сигналов, для которых необходимо выполнение процедуры предварительной фильтрации низкочастотных и высокочастотных помех, устранения тренда изолинии и исключения артефактов [7, 8, 10, 11].

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 выявления увеличения скорости изменения ЭКС используются операторы первой и второй производных, усиливающие высокочастотные составляющие помех.

Обнаружитель 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

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

где t_i – момент времени для оценки статистической неопределенности выборки значений ЭКС; u_i – значение ЭКС в i -й момент времени; N – количество значений в выборке ЭКС скользящего окна.

Информационная неопределенность ЭКС проводится на основе оценки энтропии выборки значений ЭКС скользящего окна, определяемая как математическое ожидание логарифма

рифта функции плотности вероятности. Для расчета энтропии в скользящем окне используется формула

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

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; Δu_{si} – 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, отнесенное к интервалу временного окна. Формула для расчета энтропийно-параметрического потенциала имеет вид

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

На рис. 2 показано изменение энтропийно-параметрического потенциала $\Delta_{\text{эн}}(t_i)$ для выборки значений скользящего окна в различные моменты времени t_i . Там же показаны изменения энтропийной $\Delta_s(t_i)$ и параметрической $\sigma(t_i)$ составляющих потенциала.

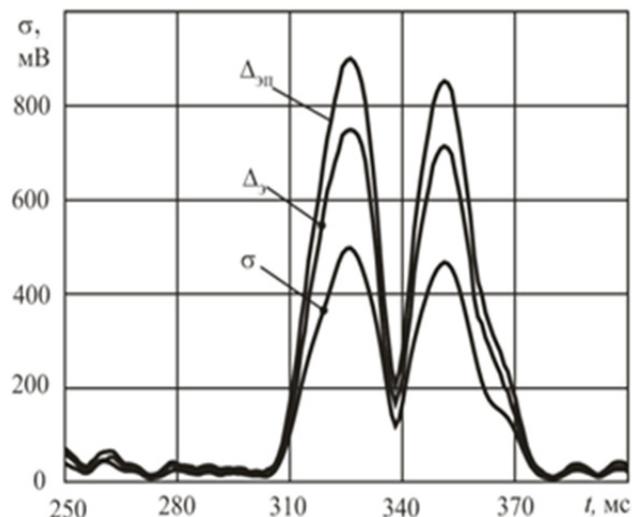


Рис. 2. Изменение оператора первой производной в скользящем окне при обнаружении QRS комплекса

Точки минимума энтропийно-параметрического потенциала соответствуют положению максимумов R зубцов, что делает возможным оценку RR -интервалов на основе вероятностной и информационной обработки значений потенциалов ЭКС скользящего временного окна.

Таким образом, обнаружители QRS комплекса, построенные на вероятностной и информационной неопределенности 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 variability сердечного ритма [15, 16].

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 стати-

стического степенного ряда дана в работе [17]. 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 позволило 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 $\mu_4(t_i)$ 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 рассчитан 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 $X_{\mu n}$:

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

Пример работы обнаружителя QRS комплекса показан на рис. 3, где обозначено: 1 – QRS комплекс ЭКС; 2 и 3 – центральные моменты 3-го и 4-го порядка, приведенные к их максимальным значениям; 4 – справедливость неравенства (6).

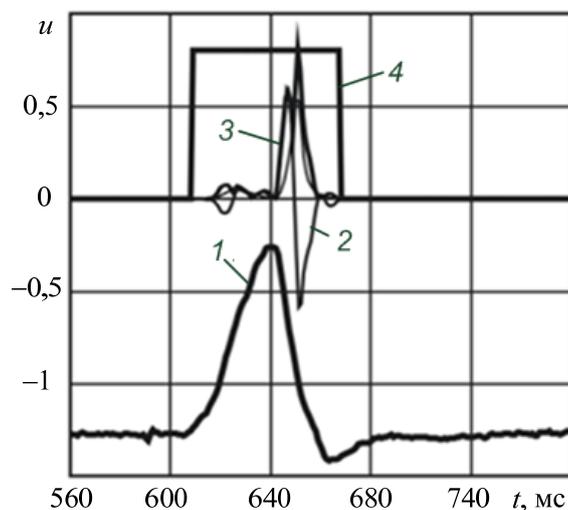


Рис. 3. Изменение операторов суммы производных второго и третьего порядка в скользящем окне

Пороговое значение контролируемого параметра X_{μ} для обнаружения QRS комплекса при достоверности обнаружения 0,95 устанавливается на уровне $10^{-1} \dots 10^{-2}$. 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 отражены 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. 4, где цифрами обозначены: 1, 2 и 3 – QRS комплекс, T и P -зубцы соответственно.

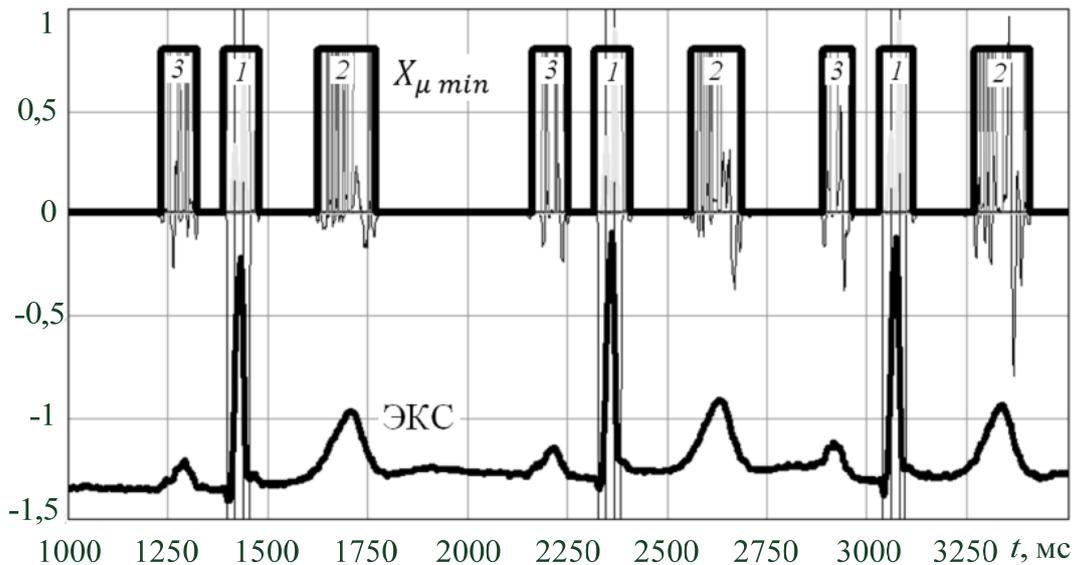


Рис. 4. Обнаружение QRS комплекса, P и T -зубцов

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

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 возможностей обнаружителей QRS -комплекса следует отметить возможность обнаружителя, построенного на основе оператора первой производной, в котором реализуется определение максимума положения R зубца, необходимое для определения частоты сердеч-

ных сокращений ЧСС по длительности *RR*-интервалов и 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. Реализации способа контроля временной зависимости суммы третьего и четвертого моментов для выделения *QRS* стабильны при реализации автоматического анализа ЭКС. 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 производной. 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 мониторинга формирует тенденцию перехода средств медицинской диагностики на новый качественный уровень. Основные свойства обнаружителей комплекса *QRS* и зубцов ЭКС обусловлены термодинамической взаимосвязью между электрической активностью тканей сердца и неопределенностью выборки значений ЭКС скользящего временного окна, которое обнаруживается по увеличению энтропийно-параметрического потенциала во временных интервалах зубцов ЭКС. Нелинейные свойства оператора суммы второй и третьей производных, реализованной на основе суммы приведенных к максимальным значениям центральных моментов третьего и четвертого порядка выборки значений скользящего окна, позволяет 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, информация которых 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. Устройство для регистрации электрокардиосигнала в условиях свободной двигательной активности / Бодин О. Н., Кривоногов Л. Ю., Петровский М. А., Рахматуллоев Ф. К., Иванчуков А. Г., Бальзанникова Е. А., Папшев Д. В. ; Бюл. № 4.
3. A new telemonitoring system intended for chronic heart failure patients using mobile telephone technology – feasibility study/ S. Winkler, M. Schieber, S. Lucke et al. // Int J Cardiol. – 2011. – Nov. 17, № 153 (1). – P. 55–63.
4. Telemonitoring with implantable electronic devices in young patients with congenital heart diseases / P. A. Zartner, N. Toussaint-Goetz, J. Photiadis et al. // Europace. – 2012. – Feb. 2.
5. Бодин, О. Н. Методы и средства обработки кардиографической информации : монография / 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 (дата обращения: 12.09.2015).
7. Рангайян, Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р. М. Рангайян. – М. : Физматлит, 2007. – 440 с.
8. Clifford, G. D. Signal processing methods for heart rate variability analysis / G. D. Clifford. – PhD Thesis michaelmas Term., 2002. – 244 p.

9. Digital Signal Processing. C-Language Examples and Laboratory experiments for the IBM PC // ECG QRS Detection / ed. Tomkins W. J. – 2000. – 450 p.
10. Пат. 2410023 Российская Федерация. Способ выделения QRS-комплекса электрокардиосигнала / Бодин О. Н., Зайцева О. А. Кривоногов Л. Ю., Логинов Д. С., Рахматуллов Ф. К. ; Бюл. № 1.
11. 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. – P. 85–97.
12. Дроздов, Д.В. Влияние фильтрации на диагностические свойства биосигналов / Д. В. Дроздов // Функциональная диагностика. – 2011. – № 3. – С. 75–78.
13. Burri, H. Simulation of myocardial infarction by ECG filters / H. Burri, H. Sunthorn, D. Shah // Journal of Electrocardiology. – 2006. – Vol. 39, iss. 3. – P. 253–258.
14. 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.
15. Рябыкина, Г. В. Холтеровское и бифункциональное мониторирование ЭКГ и артериального давления / Г. В. Рябыкина, А. В. Соболев. – М. : Медпрактика – М, 2016. – 352 с.
16. Рахматуллов, Ф. К. Чреспищеводная электрокардиостимуляция сердца и клиническая электрофизиология антиаритмических средств: монография / Ф. К. Рахматуллов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – 112 с.
17. Полосин, В. Г. Способ статистического анализа электрокардиографической информации / В. Г. Полосин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 10. – С. 120–126.

Полосин Виталий Германович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра физики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: polosin-vitalij@yandex.ru

Polosin Vitaly Germanovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of physics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 53.082.9: 612.172.4

Полосин, В. Г.

Энтропийно-параметрические обнаружители зубцов электрокардиосигнала / В. Г. Полосин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 61–69. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-9.