

УДК 615.47

**Б.А. Истомин****СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭКГ С УЧЕТОМ  
ИХ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ**

*Приведена дихотомическая классификация процедур, используемых в алгоритмах обнаружения QRS-комплексов с целью определения наиболее помехоустойчивых.*

*Сигнал; классификация; информативный признак; обнаружение.*

**B.A. Istomin****ORDERING OF METHODS OF THE ECG ANALYSIS TAKING  
INTO ACCOUNT THEIR NOISE STABILITY**

*In article dichotomizing classification of the procedures used in algorithms of detection of QRS-complexes for the purpose of definition of most noiseproof is resulted.*

*A signal; classification; an informative sign; detection.*

Форма QRS-комплексов определяется физиологическими особенностями конкретного пациента, расположением электродов для съема ЭКС, патологиями сердечно-сосудистой системы. Каждая реализация ЭКС характеризуется индивидуальной формой QRS-комплексов, причем даже при исследовании конкретной реализации ЭКС могут происходить медленные или скачкообразные изменения формы. Изменчивость формы QRS-комплексов ведет к изменению их амплитудно-временных и частотных параметров.

При реализации некоторых диагностических методик, связанных с исследованием ЭКС в присутствии стресса, а также в режиме двигательной активности пациентов (холтеровское мониторирование, нагрузочные тесты), повышается как интенсивность помех, так и изменчивость QRS-комплексов. В этих случаях для обнаружения QRS-комплексов приходится учитывать целый ряд отличительных признаков сигнала от помех, которые находятся в корреляционных, спектральных, частотных, временных, вероятностных или структурных характеристиках сигнала.

Несмотря на изменчивость, существуют общие закономерности, наблюдаемые в конфигурации формы QRS-комплексов [1]:

1. Основная энергия типичных QRS-комплексов сосредоточена в области частот от 2 до 20 Гц с максимумом на частоте около 12 Гц.
2. Частотный диапазон QRS-комплексов изменяется при патологиях и динамике сердечного ритма.
3. QRS-комплекс имеет определенную структуру и состоит из нескольких простых разнонаправленных импульсов (от 1 до 7).
4. Форма каждого простого импульса близка к треугольной или колоколообразной.
5. Амплитуда QRS-комплекса лежит в диапазоне 0,6-4,1 мВ.
6. Длительность QRS-комплекса находится в диапазоне 50-180 мс.
7. Скорость изменения сигнала составляет 5-225 мВ/с;
8. QRS-комплекс начинается и заканчивается на уровне изолинии.

Кроме достоверности обнаружения факта наличия QRS-комплекса, важным параметром алгоритмов обнаружения является точность определения его временного местонахождения в случае обнаружения самого QRS-комплекса. Особенно этот параметр имеет значение при наличии в исследуемом ЭКС QRS-комплексов различной формы. В качестве критериев оценки точности определения временного

положения обнаруженного элемента в [2] используются Detection Accuracy (%), Position Accuracy (мс), в [1] – временная неопределенность обнаружения (ВНО), т.е. временной интервал между истинным положением опорной точки и его значением, полученным в результате обнаружения. ВНО характеризуется усредненной абсолютной погрешностью

$$\Delta_t = \frac{\sum_{i=1}^n |t_i^{on} - t_i^{обн}|}{n}$$

и СКО от временного положения опорной точки  $t_i^{on}$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i^{on} - t_i^{обн})^2}{n}},$$

где  $t_i^{on}$  – момент времени, соответствующий истинному положению опорной точки,  $t_i^{обн}$  – момент времени, соответствующий обнаруженному положению элемента,  $n$  – количество элементов (QRS-комплексов) в исследуемом ЭКС.

Алгоритмы обнаружения QRS-комплексов являются предметом исследования и разработки на протяжении нескольких десятилетий. Особый интерес представляет обнаружение QRS-комплексов ЭКС в режиме реального времени.

Для сравнения алгоритмов обнаружения между собой, выявления лучших из них по различным критериям, изучения тенденций и направлений совершенствования проводится их классификация. Известно несколько вариантов классификаций алгоритмов обнаружения QRS-комплексов [3-5]. Все они имеют определенные недостатки, в первую очередь группы не имеют явно выраженных признаков.

Прежде чем проводить классификацию алгоритмов обнаружения, представим их в виде нескольких последовательных этапов (рис. 1):

- ◆ предварительная обработка сигнала, с целью его выделения на фоне помех (чаще всего линейная частотная фильтрация);
- ◆ специфическое преобразование, обеспечивающее формирование информативных признаков (ИП);
- ◆ сравнение с порогами и принятие решения.

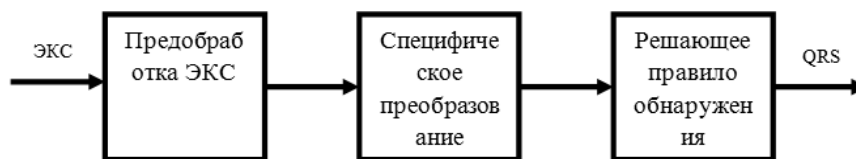


Рис. 1. Обобщенная структура типового алгоритма обнаружения QRS-комплексов

Хотя структура, показанная на рис. 1, достаточно обобщенная и простая, тем не менее, практически все алгоритмы обнаружения QRS-комплексов можно представить в таком виде. Очевидно, что метод формирования информативных признаков (второй этап) является определяющим и влияет на построение решающего правила обнаружения. При этом задачей выбора признаков является не только уменьшение

размерности вектора, представляющего обнаруживаемый сигнал, но и обеспечение высокой достоверности правильного распознавания, что достигается устранением избыточной информации. Поэтому успешность обнаружения QRS-комплексов в значительной мере определяется удачным выбором метода получения ИП ЭКС. При этом специфическое преобразование отнюдь не должно сохранять исходных данных сигнала, в данном случае, возможно любое видоизменение – главным требованием является выделение информативных признаков над неинформативными. К примеру, известный алгоритм Пана-Томпкинса, на выходе из блока специфического преобразования дает сигнал, совершенно отличный от исходного, что позволяет в дальнейшем эффективно находить информативные признаки.

Принимая во внимание ключевую роль второго этапа, классифицировать алгоритмы обнаружения целесообразно по признакам специфического преобразования.

Предложена дихотомическая классификация алгоритмов обнаружения QRS-комплексов, которая приведена на рис. 2. В основу классификации положены следующие ключевые признаки:

- ◆ вид преобразования;
- ◆ наличие декомпозиции сигнала;
- ◆ наличие адаптации к изменениям свойств сигналов и помех;
- ◆ чувствительность к изменениям свойств сигналов и помех;
- ◆ вид базовой математической операции обработки.

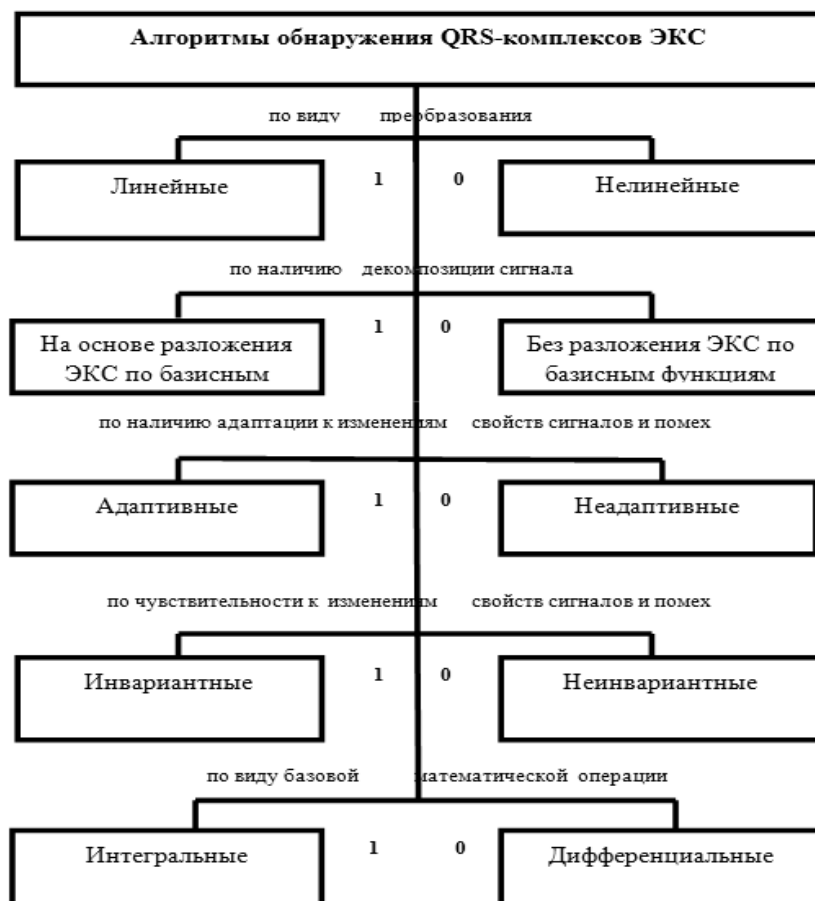


Рис. 2. Дихотомическая классификация алгоритмов обнаружения QRS-комплексов

По виду специфического преобразования алгоритмы обнаружения делятся на линейные и нелинейные. Традиционно для предварительной обработки ЭКС в основном применяются методы частотной линейной фильтрации, что связано с наличием подходящего математического аппарата, простотой интерпретации и расчета линейных фильтров. Тем не менее, применение только частотных линейных фильтров не позволяет получить эффективные обнаружители QRS-комплексов ЭКС.

Применение нелинейных процедур при обнаружении позволяет подчеркнуть некоторые особенности QRS-комплексов и повысить эффективность их обнаружения. Примером обнаружителя на основе нелинейных процедур является классический алгоритм Пана-Томпкинса (нелинейная процедура – возведение в квадрат) [6], другие нелинейные алгоритмы: обнаружитель на основе произведения двух сигмоидальных функций [7] и ранговые алгоритмы обнаружения [1].

По наличию декомпозиции сигнала алгоритмы обнаружения могут базироваться на разложении ЭКС по базисным функциям или же без такового. В первом случае формирование признаков осуществляется в преобразованном пространстве, где из  $n$ -мерного вектора признаков в другом пространстве получают вектор признаков меньшей размерности, во втором случае формирование ИП происходит в области исходного описания сигналов, путем сокращения избыточности. Разложение сигналов по опорным базисам является традиционным приемом для определения интегральных ИП (коэффициентов разложения) в задачах медицинской диагностики. Один и тот же сигнал может быть разложен по различным системам базисных функций. Выбор базиса во многом обусловлен спецификой решаемых задач, а также требованиями, предъявляемыми при их решении.

Эффективность обнаружения достигается за счет разделения в пространстве признаков информации о помехах и сигнале с последующим использованием только последней. На практике в процедурах выделения ИП ЭКС широко используются линейные ортогональные преобразования и, в частности, те из них, которые имеют быстрый вычислительный алгоритм, обеспечивающий возможность оперативного анализа данных. Для обнаружения QRS-комплексов ЭКС представляют интерес базисы, обладающие свойствами локальности и адаптивности. На практике широкое распространение получили вейвлет-базисы, обладающие свойством локализации QRS-комплексов [5] и адаптивный базис Карунена-Лоэва.

При исследовании ЭКС, как правило, нет полного объема априорных сведений о свойствах сигналов и помех, требуемых классической теорией статистического синтеза информационных систем. В связи с этим необходимо создание обнаружителей QRS-комплексов, которые могли бы успешно функционировать в условиях непредвиденных изменений характеристик сигналов и помех. Решение этой задачи идет в двух направлениях:

- ◆ адаптивное, состоящее в подстройке структуры и параметров обнаружителей при изменении условий функционирования;
- ◆ непараметрическое (инвариантное), которое сводится к обеспечению нечувствительности обнаружителей к изменениям свойств сигналов и помех.

Адаптация применяется, когда неизвестна небольшая совокупность параметров сигналов и помех. Если же число неизвестных параметров велико, то адаптация неэффективна, и тогда применяют непараметрические методы, основанные на теории непараметрической проверки гипотез. Инвариантные свойства непараметрических процедур достигаются общим для всех них техническим приемом: на начальном этапе обработки сокращается избыточность входной информации путем редукции таким образом, чтобы полученные данные оказались инвариантными к некоторым характеристикам входных данных (форме QRS-комплексов, ЧСС, отведению, индивидуальным особенностям ЭКС, распределению входных данных и т.д.).

В качестве математических операций, лежащих в основе обнаружителей QRS-комплексов, широко применяется дифференцирование и интегрирование. Для QRS-комплекса характерна наибольшая скорость изменения напряжения, а поскольку скорости соответствует оператор производной, то операция  $du/dt$  является наиболее логичной для специфического преобразования. Дифференцирование ЭКС позволяет усилить высокочастотные компоненты, к которым, в первую очередь, относится QRS-комплекс, и подавить низкочастотные компоненты зубцов Р и Т. Повторное дифференцирование почти полностью подавляет низкочастотный дрейф изолинии.

Кроме высокой скорости изменения сигнала, QRS-комплексы имеют достаточно большую площадь. Интегрирование ЭКС в скользящем окне устраняет высокочастотные случайные помехи и позволяет получить сигнал, пропорциональный площади. При этом, если предварительно устранить низкочастотные компоненты ЭКС (зубцы Р и Т), то на выходе интегратора получим единственный импульс, соответствующий QRS-комплексу.

Многие алгоритмы обнаружения QRS-комплексов, в частности алгоритм Пана-Томпкинса [6], сочетают в своем составе обе операции (дифференцирование с последующим интегрированием), что позволяет повысить эффективность обнаружения QRS.

Предложенная классификация является достаточно обобщенной, но позволяет четко разделить все известные алгоритмы обнаружения QRS-комплексов по ключевым признакам и может служить базой для создания подробной и полной классификации.

Анализ классификационных групп позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективные алгоритмы обнаружения QRS-комплексов строятся на основе нелинейных преобразований, разложении по базисным функциям, при сочетании адаптивного и инвариантного подхода, а также при использовании фильтрующих свойств операторов дифференцирования и интегрирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кривоногов Л.Ю.* Методы и алгоритмы помехоустойчивой обработки электрокардиографической информации: Дисс... канд. техн. наук. – Пенза, 2003.
2. *Diery A., Rowlands D., James D.A., Caimore T.* Nonlinear processing techniques for P-wave detection and classification: a review of current methods and applications. <http://www.aprs.org.au/anziis2003/Papers/paper173.pdf>.
3. *Нагин В.А.* Распределенная компьютерная система сбора и математической обработки электрофизиологических сигналов: Дисс... канд. техн. наук. – М., 2002.
4. *Барановский А.Л., Калинин А.Н., Манило Л.А. и др.* Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Л. Барановского и А.П. Немирко. – М.: Радио и связь, 1993.
5. *Ладяев, Д.А.* Алгоритм обнаружения QRS-комплексов ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования: Дисс... канд. техн. наук. – Саранск, 2007.
6. *Pan J., Tompkins W.J.* A real time QRS detection algorithm. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. BME-32, 1985. – P. 230-236.
7. *Варнавский А.Н.* Способы и средства выявления нарушений ритма сердца на основе нелинейных преобразований электрокардиосигнала в режиме реального времени: Дисс... канд. техн. наук. – Рязань, 2008.

**Истомин Борис Александрович**

Пензенский государственный университет.

E-mail: bob-magni@ya.ru.

440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

Тел.: 88412563511.

**Istomin Boris Aleksandrovich**  
Penza State University  
E-mail: bob-magni@ya.ru  
40, Krasnaya street, Penza, 440026, Russia.  
Phone: +78412563511.

УДК 615.47

**Т.В. Истомина, Н.П. Ординарцева**

### **СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ**

*Рассмотрена специфика медицинских измерений и медицинской диагностики с учётом свойств медико-биологических объектов как объектов измерения.*

*Биологический объект; медико-биологические исследования; диагностика; измерение; погрешность; достоверность.*

**T.V. Istomina, N.P. Ordinartseva**

### **METHODS TO RAISE RELIABILITY RESULTS IN MEDICAL DIAGNOSIS**

*Specific features of medical measurement and medical diagnosis are presented due to specifications of medical-biological subjects as objects of measurement.*

*Biological subject; medical-biological research; diagnosis, measurement; error; accuracy; reliability.*

Результативность любого лечения во многом определяется достоверностью результатов медицинской диагностики.

Важность обеспечения единства и правильности диагностических данных и точной дозировки лечебных процедур ни у кого не вызывает сомнения. Достоверность результатов медицинской диагностики, т.е. вероятность правильности установленного заключения о сущности болезни и состоянии пациента в принятой медицинской терминологии, является важнейшим показателем медицинской деятельности [1].

Однако следует обратить внимание, что в случае медико-биологической диагностики информативным является не абсолютное значение измеряемого параметра в физических единицах, а отклонение измеренного значения от индивидуальной или групповой нормы, в свою очередь являющейся лишь оценкой реального диагностического правила. Диагностическая ценность измерения в «единицах нормы» зависит от точности установки границ нормы и патологии и вариации физиологического параметра. В данном случае «нормой» являются оценки по измеряемому физиологическому параметру выборок здоровых и больных данной формой заболевания. Иными словами, в силу специфики медико-биологической диагностики информативным является не столько сам результат измерения, а его сопоставление с индивидуальной или групповой нормой. Так, в терапевтических процедурах важным является не только мощность источника, воздействующего на пациента, но и количество энергии, рассеиваемой непосредственно в теле пациента.

Биологический объект – стохастическая нестационарная нелинейная система с распределёнными параметрами. То есть система, состояние которой может быть определено только с некоторой вероятностью, её параметры изменяются во времени и зависят от места измерения внутри или на поверхности организма. Условия, при которых систему можно считать детерминированной, стационарной, линейной