

УДК 53.088.7, 681.2.084, 612.172.4

ЭНТРОПИЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА

Бодин О.Н., Иванчуков А.Г., Полосин В.Г., Рахматуллов Ф.К.

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Пенза, e-mail: Anton@dezigner.ru

В статье рассмотрен способ контроля электрокардосигнала (ЭКС), основанный на вычислении важнейших статистических параметров выборки результатов за период одного кардиоцикла и их сравнении со статистическими параметрами нормального ЭКС. Предлагаемый подход базируется на таких статистических параметрах, как коэффициент энтропии, контрэкссесс, среднее квадратическое отклонение, коэффициент асимметрии. Для анализа ЭКС построена траектория изменения положения изображающей точки кардиоцикла в пространстве коэффициента энтропии и контрэкссесса в течение времени наблюдения. Эта траектория позволяет установить наличие или начало развития патологии сердца при выходе параметров за допустимые пределы в автоматическом режиме без привлечения медицинского персонала. Отклонение контролируемых статистических параметров ЭКС от параметров нормального сигнала свидетельствует о наличии патологии сердца.

Ключевые слова: электрокардосигнал (ЭКС), функция распределения, статистическая обработка

ENTROPY-PARAMETRIC ECS PROCESSING

Bodin O.N., Ivanchukov A.G., Polosin V.G., Rakhmatullov F.K.

FGBOU VPO «Penza State University», Penza, e-mail: Anton@dezigner.ru

This paper considers the way of electrocardiosignal control (ECS control), which is based on the calculation of important statistical parameters of the results sample for the one period of the cardiac cycle and on their comparison with the statistical parameters of the results sample for the normal ECS control. The described way is based on such statistical parameters, as entropy factor, a counterexcess, an average quadratic deviation, asymmetry factor. For analysis ЭКС the trajectory of position change of a representing point for the cardiac cycle is constructed in space of a entropy factor and of a counterexcess during time of supervision. This trajectory allows to establish presence or the development beginning of heart pathologies in an automatic mode without the medical personnel if control parameters exits from admissible limits. The deviations of controllable statistical parameters ЭКС from parameters of a normal signal are the basis to start preventive actions or the reference in medical institution.

Keywords: the electric cardiac signal (ECS), the statistical processing, the distribution function

... одним из самых плодотворных способов описания характера изменчивости является применение соответствующего закона распределения, который определяет вероятность того, что результат измерения какого-либо параметра индивидуума, выбранного случайным образом, будет иметь любое заданное значение или лежать в определенном интервале значений ...

Н. Бейли [3]

Основная информация о состоянии сердца содержится в электрокардосигнале (ЭКС), регистрирующем прохождение электрического импульса по проводящей системе сердца. Изменение двигательной активности человека, воздействие окружающей среды и заболевания сердца влияют на форму и длительность отдельных элементов кардиоцикла. Сложность строения такого биологического объекта, как сердечно-сосудистая система, не позволяет построить однозначную математическую модель между ЭКС и состоянием отдельных анатомических органов сердца. Наличие изменчивости внутренней организации

сложной структуры объекта определяет вероятностное наблюдение характерных для объекта значений. В этих случаях для описания объектов прибегают к статистическим моделям, связывающим только наиболее важные параметры объекта исследования и учитывающие наличие изменчивости его внутренней структуры.

На рис. 1 показан характерный кардиоцикл здорового человека, где отмечены положения *P*, *Q*, *R*, *S* и *T* зубцов. Заболевания сердца искажают отдельные элементы кардиоцикла. Вероятность перехода системы в патологическое состояние зависит от отклонений в зубцах и сегментах ЭКС. Прогнозирование поведения сложного объекта возможно на основе современных статистических методов [5].

Настоящая статья посвящена особенностям анализа ЭКС здоровых людей на основе энтропийно-параметрической обработки.

Энтропийно-параметрический подход к анализу ЭКС

Своевременное прогнозирование сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) является приоритетным направлением современной медицины. В качестве эффективного

инструмента выбора формы для построения математической модели объекта наблюдения следует выделить анализ энтропии результатов наблюдения, разработанный для прогнозирования АВ блокад при контроле восстановления миокарда [1]. Для получения прогноза возникновения ИМ авторами работы предложен метод контроля состояния сердечно-сосудистой системы посредством наблюдения формирования траектории для положений изображающей точки состояния системы в пространстве коэффициента энтропии и контерэксцесса результатов анализа ЭКС, полученных в течение периода наблюдения. Если траектория изображающей точки выходит за пределы области допустимых положений или наблюдается её устойчивое движение к этой границе, то контролируемой системой выдаётся автоматическое сообщение о появлении опасных симптомов развития заболевания. Ранее подобный способ исследования поведения изображающей точки сложного объекта в энтропийно-параметрических осях показал хорошие результаты при получении аппроксимаций измерений с помощью распределения Вейбулла – Гнеденко [4].

Для получения прогноза ИМ с помощью методов статистического анализа ЭКС осуществляют построение функции распределения выборки результатов в течение периода наблюдения. На рис. 2 показана

характерная гистограмма распределения для одного кардиоцикла. Распределение, построенное для кардиоцикла (см. рис. 1), имеет следующие статистические параметры: коэффициент энтропии $K_3 = 1,34$; контерэксцесс $\kappa = 0,286$; среднее квадратическое отклонение $\sigma = 328$ мВ, коэффициент асимметрии $Sk = 2,56$.

Траектория изображающей точки

Непрерывный контроль состояния сердца возможен на основе наблюдения за такими характерными статистическими параметрами, как центральные моменты и энтропийно-параметрический потенциал. Наличие ССЗ обуславливает изменение формы ЭКС, что в свою очередь отразится на параметрах статистического распределения. К примеру, при исчезновении *T*-зубца в ЭКС, из распределения изымаются значения 3, соответствующие *T*-зубцу, и добавятся значения 2, близкие к изолинии (см. рис. 2).

Подобное перераспределение значений между областями группирования данных в гистограмме обусловит изменение формы распределения и уменьшение коэффициента энтропии распределения. При этом параметры распределения примут значения: коэффициент энтропии $K_3 = 0,733$; контерэксцесс $\kappa = 0,21$; среднее квадратическое отклонение $\sigma = 289$; коэффициент асимметрии $Sk = 4$.

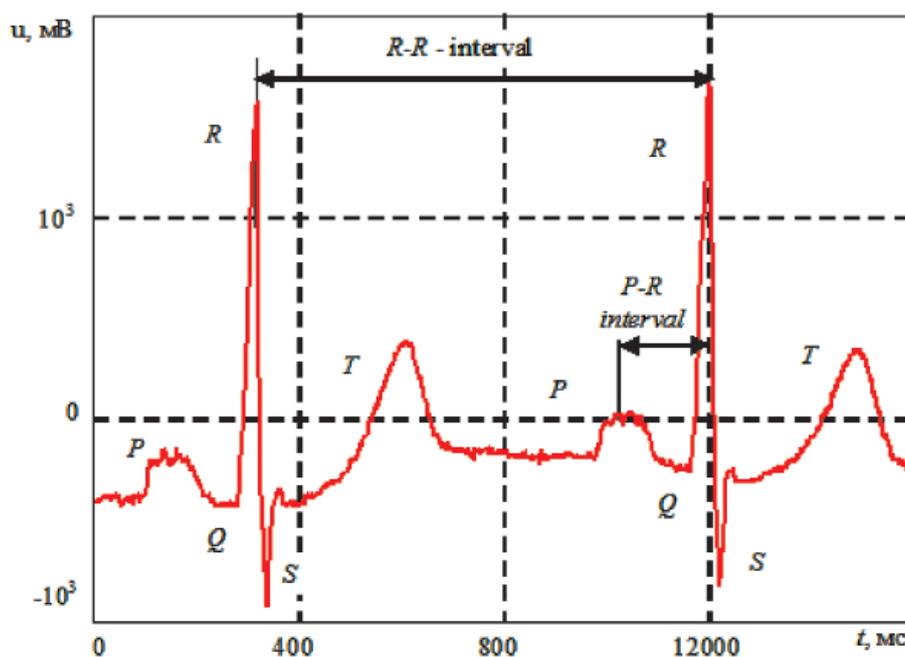


Рис. 1. Характерные интервалы кардиоцикла здорового человека

Изменение коэффициента энтропии, эксцесса и асимметрии свидетельствуют об изменении формы распределения. Следовательно, на основе контроля формы распределения значений ЭКС возможен эффективный контроль состояния пациента. Для этого ЭКС оцифровывается через временные промежутки Δt и относительно

момента времени t_1 выделяется выборка результатов измерений в интервале времени $[t_1 - T_u/2, t_1 + T_u/2]$ одного периода кардицикла T_u . Тогда для расчёта центрального момента n -го порядка $\mu_n(t_1)$ и энтропийный потенциал $\Delta_s(t_1)$ выборки значений в выделенном интервале для произвольного момента времени t_1 справедливы выражения вида:

$$\mu_n(t_1) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m n_j(t_1) \cdot \left(\left(j - \frac{1}{2}(N+1) \right) \cdot \Delta u \right)^n; \quad (1)$$

$$\Delta_s(t_1) = \frac{1}{2} N \cdot \Delta u \cdot \exp \left(-\frac{1}{N} \sum_{j=1}^m n_j(t_1) \cdot \ln(n_j(t_1)) \right), \quad (2)$$

где Δu – ширина интервала группирования данных, равная отношению аппаратного заданного диапазона изменения сигнала кардиограммы u_d к числу $m = \sqrt{N}$ группирования данных: $\Delta u = \frac{1}{m} u_d$; N – число значений в выборке обрабатываемого кардицикла: $N = \left[\frac{T_u}{\Delta t} \right]$; $n_j(t_1)$ – число значений, попавших j -й в интервал группирования данных

$$\left[\left(j - \frac{1}{2} N \right) \cdot \Delta u + M(t_1) \right] \leq u_d < \left[\left(j + \frac{1}{2} N \right) \cdot \Delta u + M(t_1) \right];$$

$M(t_1)$ – математическое ожидание для выборки значений за период кардицикла:

$$M(t_1) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N u(t_i - t_1). \quad (3)$$

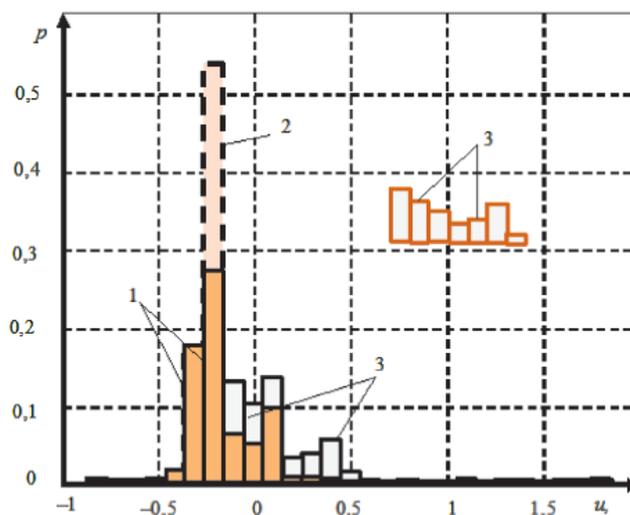


Рис. 2. Распределение выборки значений для одного кардицикла:
 1 – распределение для кардицикла здорового пациента;
 2 – изменение распределения при отсутствии зубца T;
 3 – распределение значений для T-зубца

Выражения (1), (2) и (3) позволяют получить кинетические уравнения для изменения коэффициента энтропии, асимметрии и контрэксцесса во времени. Кинетическое уравнение для коэффициента энтропии получим, разделив выражение (2) для

энтропийного потенциала на корень квадратный выражения (1), записанное для 2-го центрального момента:

$$K_2(t_1) = \frac{\Delta_2(t_1)}{\sqrt{\mu_2(t_1)}} = \frac{1}{2} N \sqrt{N} \frac{\exp\left(-\frac{1}{N} \sum_{j=1}^m n_j(t_1) \cdot \ln(n_j(t_1))\right)}{\sqrt{\sum_{j=1}^m \left(n_j(t_1) \cdot \left(j - \frac{1}{2}(N+1)\right)^2\right)}} \quad (4)$$

Кинетическое уравнение для контрэксцеса получаем, разделив квадрат второго центрального момента $\mu_2(t_1)$ (выражение (1) при $n = 2$) на четвёртый центральный момент $\mu_4(t_1)$ (выражение (1) при $n = 4$):

$$\kappa(t_1) = \frac{\mu_2(t_1)}{\sqrt{\mu_4(t_1)}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\sum_{j=1}^m n_j(t_1) \cdot \left(j - \frac{1}{2}(N+1)\right)^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^m n_j(t_1) \cdot \left(\left(j - \frac{1}{2}(N+1)\right)\right)^4}} \quad (5)$$

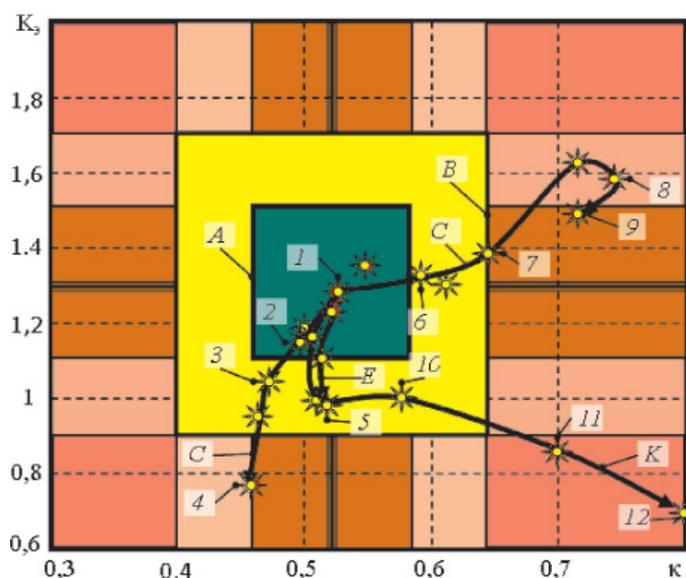


Рис. 3. Области допустимых значений для кардиограммы здорового человека в пространстве коэффициента энтропии и контрэксцесса

Если ЭКС не меняется при переходе от одного кардиоцикла к другому, то состав выборки значений также остаётся неизменным, что обуславливает неизменность центральных моментов и энтропийного потенциала. Следовательно, остаются неизменными коэффициент энтропии и контрэксцес. Наличие изменений в кардиоциклах приведёт к изменению параметров распределения. При этом изменение зубцов и сегментов ЭКС изображается в пространстве энтропийного коэффициента и контрэксцесса в виде траекторий изображающей точки. При этом различным формам ЭКС здоровых пациентов в пространстве энтропийного коэффициента и контрэксцесса возможно задание такой области допустимых значений, для которой траектория изображающей точки не выйдет за пределы границ этой области.

На рис. 3 показаны области допустимых значений для кардиограммы здорового пациента в пространстве коэффициента энтропии и контрэксцесса. На данном рисунке указаны следующие обозначения: *A* – граница области положения изображающей точки для здоровых пациентов; *B* – граница области положения изображающей точки для пациентов с наличием заболевания; *C* – траектория перемещения изображающей точки при изменении состояния пациента от здорового в точке 1 к состоянию наличия заболевания в точке 4, диагностируемом по исчезновению *T*-зубца, где точки 2 и 3 соответствуют уменьшению высоты *T*-зубца до 60 и 40% от исходной его высоты; *D* – траектория перемещения изображающей точки при изменении состояния пациента от состояния «пациент здоров» в точке 1

к состоянию ССЗ в точке 9, диагностируемому по полному исчезновению *R*-зубца, где точки 6, 7 и 8 соответствуют уменьшению высоты *R*-зубца до 70, 60 и 25 % от его начального значения; *E* – траектория перехода от состояния «пациент здоров» в точке 1 к состоянию ССЗ в точке 5, диагностируемому по полному или частичному исчезновению одного из зубцов: *P*-зубца или *S*-зубца; *K* – траектория перемещения изображающей точки от состояния «пациент здоров» в точке 1 к состоянию ССЗ «Инфаркт миокарда», диагностируемому в точках 11 и 12 по непосредственному переходу от *R*-зубца к *T*-зубцу на высоте 0,8 от высоты *T*-зубца и на высоте половины *R*-зубца соответственно. Точка 10 соответствует началу развития «инфаркта миокарда».

Заключение

Таким образом, статистический анализ выборки измерений ЭКС за один кардицикл может устанавливать наличие ССЗ на основании исследования статистических параметров функции распределения в пространстве энтропийного коэффициента и контрэксцесса посредством контроля результатов статистического анализа ЭКС по положению изображающей точки. Для этого выделена область допустимых статистических параметров, при которых патологии отсутствуют. Отклонение энтропии или контрэксцесса выборки результатов ЭКС за пределы допустимой области значений свидетельствует о наличии искажения ЭКС, что в свою очередь свидетельствует о какой-либо имеющейся патологии сердца. Выделение в пространстве коэффициента энтропии и контрэксцесса областей «Здоров», «Возможно ССЗ» и «Болен» позволяет проводить предварительный диагноз ССЗ в автоматическом режиме, который способен сигнализировать о необходимости введения ограничений на двигательную активность и, при необходимости, срочном обращении за неотложной помощью в медицинское учреждение. Использование смартфона в качестве платформы для такой системы позволяет выполнять анализ ЭКС при мониторинге состояния человека в условиях свободной двигательной активности. Также следует отметить, что рассмотренный анализ патологий ЭКС выполняется по «искажению» кардиосигналов с помощью вычислительных средств без участия высококвалифицированного медицинского персонала.

Список литературы

1. Балахонова С.А., Бодин О.Н., Полосин В.Г. Разработка и исследование моделей восстановления миокарда для прогнозирования АВ блокад / Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2013. – № 12. – С. 59–64.
2. Барбараш Л.С. Европейская программа «STENT FOR LIFE»: предпосылки, история создания, основные цели и задачи // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. – 2013. – № 1. – С. 10–18.
3. Бейли Н. Математика в биологии и медицине. – М.: Мир, 1970. – 327 с.
4. Полосин В.Г., Тертычная С.В. Анализ результатов измерения объёмной активности радона с помощью распределения Вейбулла – Гнеденко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2009. – № 1. – С. 127–133.
5. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В., Рыжаков К.В. Прогнозирование поведения сложных объектов на основе представлений нечётких ситуаций: учебное пособие. – М.: МФТИ, 2005. – 100 с.
6. Радаев Н.Н. Повышение точности прогноза событий, инициирующих чрезвычайные ситуации // Измерительная техника. – 2002. – № 5. – С. 13–20.
7. Титомир Л.И. Биофизические основы электрокардиографических методов. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2009. – 224 с.
8. Чазов Е.И., Бойцов С.А. Пути снижения сердечно-сосудистой смертности в стране // Кардиологический вестник. – 2009. – № 1. – С. 5–10.

References

1. Balahonova S.A., Bodin O.N., Polosin V.G. Razrabotka i issledovanie modelej vosstanovlenija miokarda dlja prognozirovanija AV blokad / Mehatronika. Avtomatizacija. Upravlenie. 2013. no. 12. pp. 59–64.
2. Barbarash L.S. Evropejskaja programma «STENT FOR LIFE»: predposylki, istorija sozdanija, osnovnye celi i zadachi // Kompleksnye problemy serdechno-sosudistyh zabolevanij. 2013. no. 1. pp. 10–18.
3. Bejli N. Matematika v biologii i medicine. M.: Mir, 1970. 327 p.
4. Polosin V.G., Tertychnaja S.V. Analiz rezul'tatov izmerenija objomnoj aktivnosti radona s pomoshh'ju raspredelenija Vejbul-la-Gnedenko // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Fiziko-matematicheskie nauki. 2009. no. 1. pp. 127–133.
5. Ryzhakov V.V., Ryzhakov M.V., Ryzhakov K.V. Prognozirovanie povedenija slozhnyh obektov na osnove predstavlenij nechjotkih situacij: uchebnoe posobie. M.: MFTI, 2005. 100 p.
6. Radaev N.N. Povyshenie tochnosti prognoza sobytij, iniciirujushhij chrezvychajnye situacii // Izmeritel'naja tehnika. 2002. no. 5. pp. 13–20.
7. Titomir L.I. Biofizicheskie osnovy jelektrokardiotopograficheskijh metodov. M.: FIZMATLIT. 2009. 224 p.
8. Chazov E.I., Bojcov S.A. Puti snizhenija serdechno-sosudistoj smertnosti v strane // Kardiologicheskij vestnik. 2009. no. 1. pp. 5–10.

Рецензенты:

Чувькин Б.В., д.т.н., профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы», ПГУ, г. Пенза;

Трофимов А.А., д.т.н., профессор, заместитель начальника учебно-научного центра ОАО «НИИФИ», г. Пенза.

Работа поступила в редакцию 09.02.2015.