

## ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ХАРАКТЕРНЫХ ПРИЗНАКОВ ЭЛЕКТРО-, СЕЙСМО- И ГИРОКАРДИОСИГНАЛОВ

*Рулев М.Е., Комаров Е.Г.*

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,  
Москва, Россия*

**Ключевые слова:** электросейсмокардиоблок, экспертная система, кардиосигнал, характерный признак, кодограмма, погрешность.

**Аннотация.** Статья посвящена оценке динамики характерных признаков электро-, сейсмо- и гирокардиосигналов с помощью критериев экспертной системы. Перечислены этапы обработки биофизических сигналов, регистрируемых электросейсмокардиоблоком. Приведены критерии экспертной системы для сравнения кодограмм и выполнен их расчет. Выполнен анализ влияния погрешностей электросейсмокардиоблока на значения критериев экспертной системы.

## ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF CHARACTERISTIC FEATURES OF ELECTRO-, SEISMO- AND GYROCARDIOGRAPHY SIGNALS

*Rulev M.E., Komarov E.G.*

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

**Keywords:** electroseismocardiography unit, expert system, cardiography signal, characteristic feature, codogram, error.

**Abstract.** This article assesses the dynamics of characteristic features of electrical, seismic, and cardiography signals using expert system criteria. The stages of processing biophysical signals recorded by an electroseismocardiography unit are outlined. Expert system criteria for comparing codograms are presented and calculated. An analysis of the influence of errors of the electroseismocardiography unit on the values of the expert system criteria was performed.

**Введение.** На протяжении последних десятилетий благодаря развитию компьютерных технологий получили мощный импульс для развития и совершенствования системы и алгоритмы обработки биофизических сигналов, предназначенные для оценки функционального состояния организма человека. Отличительная особенность таких сигналов заключается в наличии большого количества признаков и характеристик, по которым проводится их обработка. Например, типовые электрокардиоциклы человека, формируемые из электрокардиосигнала (ЭКС), обладают несколькими экстремумами, по положению которых судят о состоянии сердечно-сосудистой системы [1].

Помимо исследования электрокардиосигналов ведутся работы по изучению и анализу механических сигналов, генерируемых сердцем – сейсмокардиосигналов (СКС) и гирокардиосигналов (ГКС). Количество экстремумов в каждом сейсмокардиоцикле и гирокардиоцикле в 3-4 раза больше по сравнению с электрокардиоциклами, поэтому СКС и ГКС несут дополнительную информацию, в том числе содержат информацию о респираторной (дыхательной) деятельности [2].

В медицинских исследованиях все чаще используются экспертным системы (ЭС), благодаря которым получают более точные результаты при анализе большого объема данных. Однако существующие ЭС требуют значительного количества информации, включая проведение ряда клинических исследований инвазивным способом [3]. В связи с этим представляется актуальным разработка критериев ЭС для оценки динамики характерных признаков ЭКС, СКС и ГКС, регистрируемых неинвазивно с помощью электросейсмокардиоблока (ЭСКБ).

**Материалы и методы.** С целью синхронной регистрации кардиосигналов разработан ЭСКБ. Обработка сигналов осуществляется специальными алгоритмами, включающими фильтрацию, расчет характерных признаков кардиоциклов, определение их приращений и знаков приращений. Следом производят символьное кодирование найденных знаков приращений. В заключение сравнивают эталонные кодограммы заболеваний со структурированной кодограммой (вектором заболеваний) обследуемого [1]. Последний этап может быть реализован в виде ЭС с помощью следующих статистических критериев [4]:

1) нормированное Евклидово расстояние (Евклидова метрика):

$$\rho_{AB} = \frac{\|A - B\|}{N} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2}, \quad n = 1, N, \quad 0 \leq \rho_{AB} \leq 1, \quad (1)$$

где  $A = [A_1, A_2, \dots, A_n]$  – вектор символьной кодограммы №1,  $B = [B_1, B_2, \dots, B_n]$  – вектор символьной кодограммы №2,  $N$  – длины кодограмм;

2) коэффициент корреляции Пирсона:

$$r_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})(b_i - \bar{b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}}, \quad -1 \leq r_{AB} \leq 1, \quad (2)$$

где  $a = [a_1, a_2, \dots, a_n]$  – вектор количества комбинаций в соответствующих элементах вектора  $A$ ,  $b = [b_1, b_2, \dots, b_n]$  – вектор количества комбинаций в соответствующих элементах вектора  $B$ ;

3) нормированная взаимная корреляционная функция (ВКФ):

$$R_{AB} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_{i+j}, \quad j \in Z, \quad (3)$$

где  $j$  – величина смещения.

**Результаты.** В таблицу 1 сведены результаты расчета критериев ЭКС, СКС, ГКС и респираторных составляющих с указанием относительных погрешностей, рассчитанных по формуле:

$$\delta_{AB} \geq \sum_{i=1}^3 \frac{\min\{\delta_R(U_0)\} + C/K}{M(\{\Delta X_{\text{norm}}\}_i) \cdot D_R}, \quad (4)$$

где  $\delta_R(U_0)$  – случайная погрешность смещения нуля в запуске датчика ЭСКБ,  $C$  – цена младшего разряда аналого-цифрового преобразователя датчика ЭСКБ,

$K$  – коэффициент усиления аналогового сигнала датчика ЭСКБ,  $M(\{\Delta X_{\text{норм}}\}_i)$  – выборочное среднее значение приращений  $i$ -го характерного признака  $X_{\text{норм}}$ ,  $D_R$  – нормирующий коэффициент.

Табл 1. Результаты расчета критериев ЭС

| Критерий            |     | $\rho_{AB}$ | $r_{AB}$ | $\delta_{AB}, \%$ |
|---------------------|-----|-------------|----------|-------------------|
| Кардиоциклы         | ЭКС | 0,800       | 0,787    | 0,31              |
|                     | СКС | 0,467       | 0,687    | 0,01              |
|                     | ГКС | 0,667       | 0,832    | 0,28              |
| Респираторные циклы | ЭКС | 0,750       | 0,725    | 0,32              |
|                     | СКС | 0,850       | 0,760    | 0,06              |
|                     | ГКС | 0,600       | 0,677    | 0,60              |

Графики нормированных ВКФ изображены на рисунке 1.

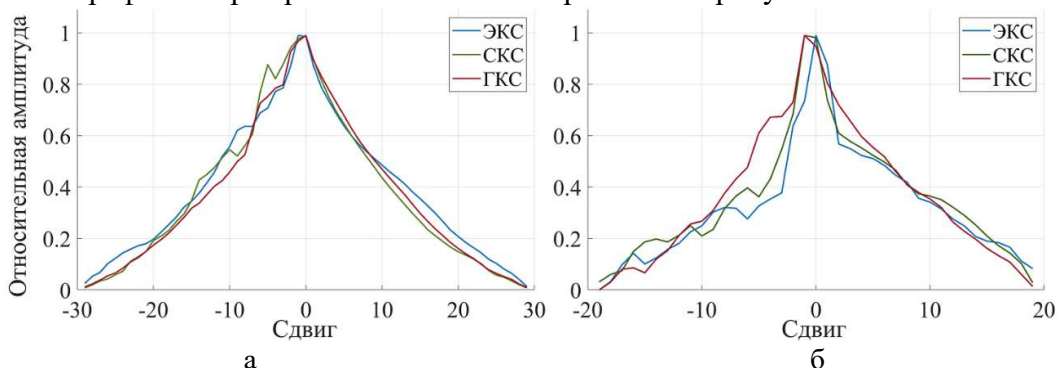


Рис. 1. Графики относительных ВКФ кодограмм кардиоциклов (а) и респираторных циклов (б)

Численные значения, указанные в таблице 1, а также графики ВКФ, показанные на рисунке 1, косвенно отражают динамику характерных признаков ЭКС, СКС и ГКС и могут быть использованы при проведении неинвазивной диагностики заболеваний.

**Заключение.** С целью оценки динамики характерных признаков ЭКС, СКС и ГКС, несущих информацию о состоянии кардиореспираторной системы человека, были разработаны и рассчитаны критерии ЭС, такие как Евклидово расстояние, коэффициент корреляции Пирсона, а также ВКФ. Относительные погрешности вычисления критериев ЭС составили менее 1%. Рассмотренные критерии позволят провести врачу количественный и качественный анализ динамики кардосигналов ЭСКБ в процессе проведения неинвазивных кардиологических исследований.

### Список литературы

1. Успенский В.М. Информационная функция сердца. Теория и практика диагностики заболеваний внутренних органов методом информационного анализа электрокардосигналов / под ред. В.Б. Симоненко. – М.: Планета, 2016. – 272 с.

2. Paukkunen M. Seismocardiography: Practical implementation and feasibility Helsinki // School of Electrical Engineering. 2014, 44 p.
3. Kaur R., Kaur A. Hypertension diagnosis using fuzzy expert system // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). National Conference on Advances in Engineering and Technology. 2014, pp. 14-18.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. – М.: Мир, 1983. – 312 с.

### References

1. Uspenskiy V.M. Information function of the heart. Theory and practice of diagnosis of diseases of internal organs by the method of information analysis of electrocardiograms. – М.: Planet, 2016. – 296 p.
2. Paukkunen M. Seismocardiography: Practical implementation and feasibility Helsinki // School of Electrical Engineering. 2014, 44 p.
3. Kaur R., Kaur A. Hypertension diagnosis using fuzzy expert system // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). National Conference on Advances in Engineering and Technology. 2014, pp. 14-18.
4. Bendat J., Pirson A. Application of correlation and spectral analysis. – М.: World, 1983. – 312 p.

|                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Рулев Максим Евгеньевич</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления                                                                  | <b>Rulev Maksim Evgenyevich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of automatic control systems                                             |
| <b>Комаров Евгений Геннадиевич</b> – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры проектирования и технологии производства электронной аппаратуры<br>maxxim98@yandex.ru | <b>Komarov Evgeniy Gennadiyevich</b> – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of design and technology of electronic equipment production |

*Received 05.08.2026*