

УДК 53.089: 53.09(6) :519.2(33): 538.953(1)

*В. Г. Полосин, О. Н. Бодин, М. И. Сафронов*

**ОБОСНОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА  
ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРДЦА**

*V. G. Polosin, O. N. Bodin, M. I. Safronov*

**RATIONALE STATISTICAL PROCESSING OF RESULTS  
OF MONITORING OF ELECTROPHYSIOLOGICAL  
CHARACTERISTICS OF THE HEART**

**А н н о т а ц и я.** Рассмотрена задача установления количественной информации, отражающей свойства наблюдаемого объекта. Приведены схемы организации процессов измерения и управления, содержащие в своей структуре объект наблюдения и устройство формирования меры. Показано, что в структурной схеме процессов содержится для организации процессов как измерения, так и управления необходимость оценки разности  $\Delta x$  между однородными свойствами объекта и меры. Рассмотрены мера и метрическое пространство при мониторинге электрофизиологических характеристик сердца. Оценено соответствие функции аппроксимации выборке результатов измерения на основе сравнения мер, сформированных в вероятностном пространстве элементарных событий для выборки результатов измерений и для дискретных значений аппроксимирующей функции. Предложены два подхода анализа формы функций параметров аппроксимирующей функции: на основе минимизации разницы между «евклидовыми мерами» и на основе сопоставления информационных свойств функции и информационной энтропии распределения.

**A b s t r a c t.** The paper contains the problem of establishing quantitative information reflecting the properties of the observed object. The schemes of organization process measurement and control, containing in its structure the object of observation and forming apparatus measures. It is shown that in the first place in the block diagram for the process contains a process organization as measurement and control optionally-divergence estimate the difference  $\Delta x$  between homogeneous properties the observed object and the measures. Given measure and a metric space in monitoring electrophysiological characteristics of the heart. Assess the compliance function approximation sample measurement results based on the comparison of measures generated in the probability space of elementary events for sampling and measurement results for discrete values of the approximating function. Two approaches are proposed shape analysis functions of the parameters of the approximating function: on the basis of minimizing the difference between the Euclidean measures and by comparing the properties of information and information entropy distribution.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** средство измерения, мера, евклидово пространство, функция аппроксимации, информационная энтропия, мониторинг электрофизиологических параметров, метрическое пространство.

**К e y w o r d s:** means of measurement, measure, Euclidean space, function approximation, information entropy, monitoring electrophysiological parameters metric space.

**Введение**

В процессе мониторинга электрофизиологических характеристик сердца возникают задачи, для решения которых необходимо располагать количественной информацией, отражающей свойства наблюдаемого объекта. При этом процесс измерения состоит в сравнении свойства объекта исследования с мерой этого же свойства с помощью технических средств,

которые часто содержат в своей структуре средства контроля и управления. В основе структурного строения технических средств измерения и управления присутствуют характерные общие блоки и устройства. Структурная схема процесса управления дана на рис. 1,а, согласно которой контролируемая величина с объекта управления с помощью устройства сравнения сопоставляется с заданным значением меры этой же величины. Процесс измерения иллюстрирует структурная схема рис. 1,б, согласно которой измеряемая величина  $x_{и}$  объекта исследования сопоставляется с помощью устройства сравнения с мерой  $x_{м}$  однородной величины, формируемой средством измерения. В обоих случаях на выходе устройства сравнения формируется «евклидова мера» разности между значением величины, поступающей с объекта наблюдения или управления, и значением меры однородной величины. В зависимости от назначения устройства мера разности  $\Delta x$  используется для управления объектом при организации процесса контроля или управления либо для формирования меры однородной величины средства измерения.

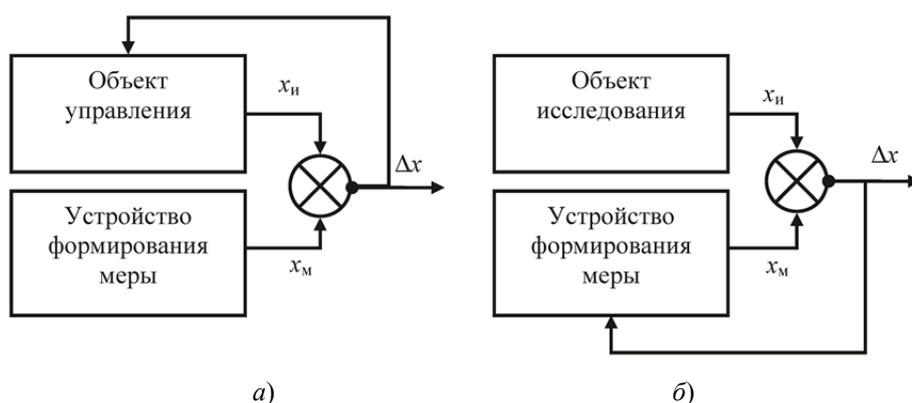


Рис. 1. Структурные схемы: а – системы управления; б – средства измерения

Таким образом, из приведенных схем организации процессов измерения и управления следует, что, во-первых, в структурной схеме процессов содержатся объект наблюдения и устройство формирования меры, во-вторых, для организации процессов необходима оценка разности  $\Delta x$  между однородными свойствами объекта и меры.

### **Мера и метрическое пространство при мониторинге электрофизиологических характеристик сердца**

В метрологии понятие меры определено как средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения значения физической величины. Более общее представление содержит математическое определение меры как числовой функции, ставящей в соответствие каждому множеству, из некоторого семейства множеств, неотрицательное число  $\rho$ . При этом функция  $\rho$  называется мерой, если она удовлетворяет свойству неотрицательности и аддитивности.

В качестве средств конструирования при разработке теоретических и практических моделей используются такие философские категории, как пространство, выражающее порядок сосуществования отдельных предметов, и время, определяющее порядок смены событий. При проведении измерений используют метрическое пространство, в котором определено расстояние между любой парой элементов этого пространства. Из известных метрических пространств следует выделить *евклидово пространство*, в котором задана операция скалярного умножения векторов и в качестве метрики пространства определена «евклидова мера», равная расстоянию между двумя его точками:

$$\rho = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (1)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты точек пространства;  $n$  – метрика пространства.

При построении измерительных средств используется структура рис. 1,б, в которой формируется «евклидова мера» измеряемого свойства объекта в текущий момент времени по

разнице между значениями меры и измеряемого свойства. В качестве недостатков такой системы следует отметить отсутствие возможностей для контроля и коррекции случайных воздействий на измеряемую величину. Для устранения этих недостатков обычно используется наблюдение величины в течение длительного времени с последующей статистической обработкой результатов наблюдения. К таким исследованиям относится, в частности, мониторинг электрофизиологических характеристик сердца.

### Средства регистрации биомедицинских сигналов и мониторинга

Ключевым элементом в системах мониторинга состояния сердечно-сосудистой системы человека являются автономные медицинские измерительные приборы. На рис. 2 дана обобщенная функциональная схема измерительного преобразователя биоэлектрической активности сердца.

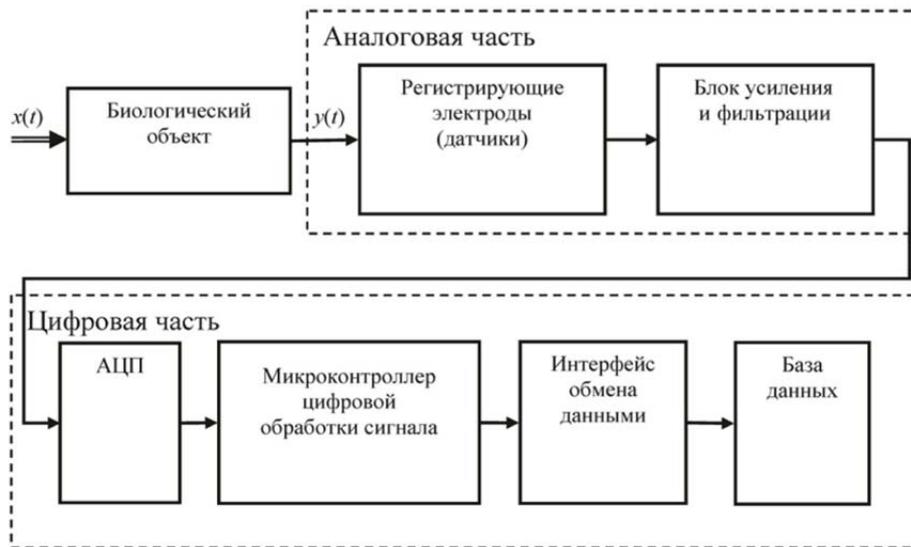


Рис. 2. Структурная схема устройства регистрации биоэлектрической активности сердца

Сигнал с биологического объекта снимается с помощью электродов, после чего производятся его аналоговая предобработка, усиление и фильтрация. Цифровая часть предназначена для оцифровки сигнала с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), его цифровой обработки с помощью микроконтроллера и передачи в базу данных с помощью интерфейса обмена данными.

Эффективный мониторинг и управление объектами возможны только при учете случайных возмущений. Классические методы исследования и анализа состояния объектов, основанные на описании случайных воздействий с помощью корреляционных функций и функции спектральной плотности, требуют значительных временных затрат, использования сложного оборудования, применения дополнительных материальных средств (применения реактивов), что обуславливает трудности применения классических методов анализа. В таких условиях мониторинг приходится осуществлять в условиях неопределенности о действующих возмущениях, что подобно «информационному вакууму».

### «Евклидова мера» пространства элементарных событий

Одной из целей анализа является нахождение функции изменения сигнала во времени при условии накладываемых случайных возмущений. Для этого формируется выборка результатов измерений сигнала в течение заданного интервала времени. На основе полученных данных находится функция аппроксимаций, параметры которой несут информацию о состоянии объекта. *Оценку соответствия* функции аппроксимации выборке результатов измерения проводят путем *сравнения мер*, формируемых в вероятностном пространстве элементарных событий для выборки результатов измерений и для дискретных значений аппроксимирующей функции, найденных в те же моменты времени.

Для анализа данных мониторинга электрофизиологических характеристик сердца формируется выборка сигнала в течение промежутка времени  $t$ . Выборка объема  $n$  значений случайной величины  $\xi$  – это совокупность значений  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  случайной величины, полученная в результате  $n$  независимых измерений в различные промежутки времени. Выборку случайных значений следует, с одной стороны, рассматривать как вектор размерности  $n$  (если эксперимент проведен и состоялся), с другой стороны, – как  $n$ -мерную случайную величину с независимыми компонентами.

При анализе случайных величин разброс выборки значений оценивается с помощью выборочной дисперсии, определяемой выражением

$$D(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i^2 - m_x^2), \quad (2)$$

где  $m_x$  – математическое ожидание, найденное для выборки значений по формуле

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (3)$$

Неотрицательное число, равное корню квадратному от выборочной дисперсии, умноженному на  $(N-1)$ , где  $N$  – количество значений в выборке, соответствует «евклидовой мере» для центрированного относительно математического ожидания пространства выборки результатов мониторинга:

$$\rho_m(x, m_{\%00}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i^2 - m_x^2)}. \quad (4)$$

Таким образом, произведение дисперсии на число  $N$  результатов эксперимента представляет собой «евклидову меру» между вектором выборки случайной величины размерности  $n$  и вектором математического ожидания той же размерности  $n$ .

Возможность построения евклидовой меры позволяет рассматривать выборку результатов как вектор  $n$ -мерного евклидова пространства и использовать ее в схемах для управления объектом (см. рис. 1,а) или для формирования меры при решении измерительной задачи (см. рис. 1,б).

В связи с тем, что с помощью выражения (4) определена «евклидова мера» выборки для результатов мониторинга, необходимо получить меру сравнения, сопоставленную аппроксимирующей функцией.

Подстановка значений временного ряда в аппроксимирующую функцию позволяет получить теоретическую выборку  $y_i$ , состоящую из  $n$  значений. Тогда мера, сопоставленная аппроксимирующей функции, находится с помощью выражения

$$\rho_m(y, m_y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i^2 - m_y^2)}, \quad (5)$$

где  $m_y$  – математическое ожидание, найденное для выборки значений  $y_i$  по формуле

$$m_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i. \quad (6)$$

*Разница мер*, сформированных в вероятностном пространстве элементарных событий, позволяет проводить *сравнение* выборки результатов измерений и выборки аппроксимирующей функции. Формула для разницы мер (4) и (5) имеет вид

$$\Delta_p = \rho_m(y, m_y) - \rho_m(x, m_x). \quad (7)$$

Выбор параметров аппроксимирующей функции осуществляется на основе минимизации разницы между «евклидовыми мерами», вычисленной с помощью выражения (7).

В результате любого процесса сравнения однородных значений объекта наблюдения и меры сохраняется неопределенность состояния объекта, минимизация которой достигается за счет организации отрицательной обратной связи в системах управления объектом или средствах измерения для формирования меры исследуемого свойства. При непрерывных процессах эта неопределенность образуется на основе разницы «евклидовых мер», заданных с помощью устройства формирования меры и фактических значений свойств физического объекта. При мониторинге эта неопределенность формируется как разница «евклидовых мер», рассчитанных в вероятностном пространстве элементарных событий для выборки случайной величины объекта и для выборки аппроксимирующей функции с априорно известной формой.

В качестве основного недостатка способа организации разности между «евклидовыми мерами» объекта или устройства формирования меры следует отметить неизменность априорно заданной формы аппроксимирующей функции. Ошибка в выборе формы функции приводит к большим значениям неопределенности «евклидовой меры» в вероятностном пространстве элементарных событий, сопоставимой с размером меры. Значительного уменьшения неопределенности меры, отражающей аппроксимирующие свойства функции, достигается путем выбора формы функции на основе дополнительной оценки ее свойств. Для определения формы функций получили распространение методы статистической оценки начальных и центральных моментов высокого порядка, которые используются для выбора форм статистических распределений [12]. Другой подход анализа формы функций состоит в сопоставлении информационного свойства функции и информационной энтропии распределения, рассчитанной для выборки результатов мониторинга. Данный подход нашел применение в современной литературе [12].

#### **Обсуждение результатов**

Таким образом, при решении задачи мониторинга электрофизиологических характеристик сердца возникает необходимость определения количественной информации, отражающей статистические свойства наблюдаемого объекта. При этом процесс измерения состоит в сравнении свойства объекта исследования с мерой этого же свойства с помощью технических средств, которые часто содержат в своей структуре средства контроля и управления. Из рассмотрения материала следует, что для организации процессов сравнения во время мониторинга эффективен метод статистического анализа совокупности результатов за промежутки времени, кратный циклу ЭКГ, что возможно как на основе оценки начальных или центральных моментов, так и на основе сопоставления информационных энтропий аппроксимирующей функции распределения и выборки результатов мониторинга.

#### **Список литературы**

1. Цветков, Э. И. Основы математической метрологии / Э. И. Цветков. – СПб. : Политехника, 2005. – 510 с.
2. Вулих, Б. З. Краткий курс теории функций вещественной переменной (введение в теорию интеграла) / Б. З. Вулих. – М. : Наука, 1973. – 352 с.
3. Лазарев, В. Л. Энтропийный подход к организации мониторинга и управления / В. Л. Лазарев // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2005. – № 6. – С. 61–68.
4. Карлюк, Е. С. Проектирование современных средств регистрации биомедицинских сигналов и мониторинга / Е. С. Карлюк, В. Л. Ткаченко, В. А. Фесечко // Электроника и связь. – 2008. – Ч. 1. – С. 166–171.
5. Вадзинский, Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский. – СПб. : Наука, 2001. – 295 с.
6. Федоров, М. В. Метод идентификации форм распределений малых выборок / М. В. Федоров // Российский химический журнал (Журнал Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). – 2002. – Т. XVI, № 3. – С. 9–11.
7. Новицкий, П. В. Основы информационной теории измерительных устройств / П. В. Новицкий. – Л. : Энергия, 1968. – 400 с.
8. Тертычная, С. В. Анализ результатов измерения объемной активности радона с помощью распределения Вейбулла – Гнеденко / С. В. Тертычная, В. Г. Полосин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2009. – № 1. – С. 127–133.

9. Рыжаков, В. В. Прогнозирование поведения сложных объектов на основе представлений нечетких ситуаций : учеб. пособие / В. В. Рыжаков, М. В. Рыжаков, К. В. Рыжаков. – М. : МФТИ, 2005. – 100 с.
10. Hwang, T. Y. On new moment estimation of parameters of the gamma distribution using its characterization / T. Y. Hwang, P. H. Huang // Annals of the Institute of STATISTICS Mathematics. – 2002. – № 54. – P. 840–847.
11. Краус, М. Измерительные информационные системы / М. Краус, Э. Вошни. – М. : Мир, 1975. – 310 с.
12. Теория передачи сигналов на железнодорожном транспорте / Г. В. Горелов, А. Ф. Фомин, А. А. Волков, В. К. Котов. – М. : Транспорт, 2001. – 415 с.

---

***Полосин Виталий Германович***

кандидат технических наук, докторант,  
кафедра информационно-измерительной техники  
и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: iit@pnzgu.ru

***Polosin Vitaliy Germanovich***

candidate of technical sciences, doctoral student,  
sub-department of information  
and measuring equipment and metrology,  
Penza State University

***Бодин Олег Николаевич***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационно-измерительной техники  
и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: bodin\_o@inbox.ru

***Bodin Oleg Nikolaevich***

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of information  
and measuring equipment and metrology,  
Penza State University

***Сафронов Михаил Иванович***

студент,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: : iit@pnzgu.ru

***Safronov Mikhail Ivanovich***

student,  
Penza State University

---

УДК 53.089: 53.09(6) : 519.2(33): 538.953(1)

***Полосин, В. Г.***

**Обоснование статистической обработки результатов мониторинга электрофизиологических характеристик сердца / В. Г. Полосин, О. Н. Бодин, М. И. Сафронов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 78–83.**