

Истомин Виктор Владимирович – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенская государственная технологическая академия» в г. Пензе; e-mail: v.ist@mail.ru; 440039, г. Пенза, проезд Байдукова, ул. Гагарина, 1а/11; тел.: 88412496009; кафедра информационных технологий и систем; аспирант.

Михеев Михаил Юрьевич – e-mail: mix1959@gmail.com; кафедра информационных технологий и систем; д.т.н.; профессор.

Istomin Victor Vladimirovich – Federal State-Owned State-Financed Educational Establishment of Higher Vocational Education “Penza State Technological Academy”; e-mail: v.ist@mail.ru; 1A/11, Baidukova/Gagarina, Penza, 440039, Russia; phone: +78412496009; the department of information technologies and systems; postgraduate student.

Mikheev Mikhail Ur’evich – e-mail: mix1959@gmail.com; the department of information technologies and systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 57.087

Л.И. Калакутский, А.А. Федотов, Е.П. Лебедева

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ БИОСИГНАЛОВ СЕРДЕЧНОГО РИТМА С ЦЕЛЬЮ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ КОРОНАРНЫХ АРТЕРИЙ

Рассматривается методика обработки биосигналов сердечного ритма (сигнал биоэлектрической активности сердца и сигнал периферической артериальной пульсации крови) для диагностики состояния эластичности коронарных артерий. Предложены показатели для оценки состояния эластичности коронарных артерий, основанные на спектральных различиях пульсового и сердечного ритмов. Была проведена клиническая апробация разработанной методики обработки биосигналов. С этой целью были сформированы 2 группы добровольцев: первая группа состояла из людей с нормальным состоянием коронарных артерий, вторая – из людей с патологическим состоянием коронарных артерий. Были получены достоверные и статистически значимые различия в значениях предлагаемых диагностических показателей для двух групп обследуемых.

Стеноз коронарных артерий; вариабельность сердечного ритма; проба с контролируемым дыханием.

L.I. Kalakutskiy, A.A. Fedotov, E.P. Lebedeva

METHOD OF PROCESSING HEART RATE BIOSIGNALS FOR DIAGNOSIS STATE OF CORONARY ARTERIES

The method of processing heart rate biosignals (the signal of bioelectrical heart activity and distal arterial pulse signal) for diagnosis coronary artery elasticity is considered. Indices to assess the elasticity of the coronary arteries based on spectral differences between pulse and heart rhythms were proposed. Clinical testing of concerned method was carried out. For this purpose, two groups of volunteers were formed: one group is consisted of people with a normal state of the coronary arteries, the second is consisted of people with a pathological condition of the coronary arteries. Reliable and statistically significant differences in the values of the proposed diagnostic indices for two groups of examinees were obtained.

Stenosis of the coronary arteries; heart rate variability; test with controlled breathing.

Одним из возможных подходов к диагностике состояния эластичности артериальных сосудов может являться определение показателей вариабельности сердечного ритма на основе обработки сигнала биоэлектрической активности сердца в ходе проведения проб с контролируемым дыханием [1]. Известно, что временная

структура сердечного ритма в этом случае будет определяться кардиореспираторным взаимодействием, что позволяет проследить влияние состояния эластичности артериальных сосудов на сердечный ритм [2, 3].

Для увеличения информативности и достоверности контроля состояния коронарных артерий в данной работе предлагается методика диагностики на основе синхронной регистрации и комплексной обработки сигналов биоэлектрической активности сердца и артериальной пульсации крови на фоне проведения пробы с контролируемым дыханием. Известно, что влияние кардиореспираторного взаимодействия на показатели сердечного ритма наиболее сильно проявляется при частоте дыхания 0,1 Гц, что может быть обусловлено наличием автоколебательного процесса в механизме вегетативного управления сердечно-сосудистой системы [4].

Для контроля состояния коронарных артерий на основе методики совместной регистрации и комплексной обработки сигналов артериальной пульсации крови и биоэлектрической активности сердца на фоне проведения пробы с контролируемым дыханием предлагается использовать следующие диагностические показатели:

$$k_1 = \left(\frac{S_{0,1\Gamma\text{ц}}^{PP}}{S_{PP}} - \frac{S_{0,1\Gamma\text{ц}}^{RR}}{S_{RR}} \right) \cdot 100 \% ; \quad k_2 = \frac{S_{0,1\Gamma\text{ц}}^{PP} - S_{0,1\Gamma\text{ц}}^{RR}}{S_{RR}} \cdot 100 \% ;$$

где $S_{0,1\Gamma\text{ц}}^{PP}$ – значение спектральной мощности временной последовательности длительностей межпульсовых интервалов на частоте 0,1 Гц, $S_{0,1\Gamma\text{ц}}^{RR}$ – значение спектральной

мощности временной последовательности длительностей R-R интервалов на частоте 0,1 Гц; S_{PP} – общая спектральная мощность временной последовательности длительностей межпульсовых интервалов; S_{RR} – общая спектральная мощность временной последовательности длительностей R-R интервалов.

Для апробации разработанной методики обработки биосигналов сердечного ритма с целью контроля состояния коронарных артерий была сформирована группа обследуемых людей, включающая в себя 30 пациентов кардиологического отделения областной клинической больницы имени Калинина. Для каждого обследуемого на основе данных коронарографии был определен показатель коронарного индекса стеноза (КИС). Все испытуемые дали добровольное согласие на включение их в исследование. Все пациенты по данным коронарографии были разделены на 2 группы. В группу А вошли 14 пациентов без коронарного стеноза; в группу Б – 16 пациентов с суммарным индексом КИС от 3 до 21 балла.

Исследование проводилось в тихой комнате при 22 °С. Записи у всех испытуемых выполнялись в период с 10⁰⁰ до 12⁰⁰, натощак, после 10 минутного отдыха в положении лежа обследуемого. Все лекарственные препараты отменялись за 12 часов до обследования. Статистическая обработка полученных результатов проводилась с помощью компьютерной программы Statistica 6.0 for Windows. Для оценки достоверности средних показателей в сравниваемых группах применяли непараметрический критерий U Манна-Уитни. Данные были представлены в виде $M \pm SD$, различия считались достоверными при $p < 0,05$.

Регистрация биосигналов проводилась с помощью пульсоксиметра «ЭЛОКС-01» и монитора пациента «КОРОС-300» с последующей обработкой данных на компьютере. Сердечный ритм регистрировался посредством записи ЭКГ в I стандартном отведении, которая осуществлялась синхронно с записью пальцевой фотоплетизмограммы (ФПГ) в течение 5 минут при спонтанном дыхании. Следующая запись производилась на протяжении 5 минут при контролируемом дыхании. Вдох и выдох осуществлялись по световому сигналу электронного метронома, запрограммированного на частоту 6 дыханий в минуту. Анализировались 5-минутные фрагменты записи сигналов ЭКГ и фотоплетизмограмм, не содержащие помех и экстрасистол.

Компьютерная обработка биосигналов позволила сформировать последовательности длительности кардиоинтервалов (КИ): межпульсовых интервалов для ФПГ сигнала и R-R интервалов для ЭКГ сигнала [6]. Для корректного осуществления спектрального анализа необходимо исходные последовательности длительностей КИ преобразовать в набор данных с эквидистантными интервалами времени. Для этого анализируемые последовательности длительностей КИ подвергались процедуре интерполяции кубическими сплайнами с частотой дискретизации 4 Гц [7]. На следующем этапе определялись спектральные показатели интерполированных последовательностей длительностей КИ на основе быстрого преобразования Фурье с использованием сглаживающего окна Ханна. На рис. 1 приведена блок-схема диагностического алгоритма обработки биосигналов сердечного ритма с целью диагностики состояния коронарных артерий.



Рис. 1. Блок-схема диагностического алгоритма обработки биосигналов сердечного ритма с целью диагностики состояния коронарных артерий

На рис. 2 и 3 приведены типовые результаты обследуемых с различным состоянием коронарных артерий. (Сверху вниз на рисунках: зависимость изменения спектральной мощности временной последовательности длительностей R-R интервалов от частоты, зависимость изменения спектральной мощности временной последовательности длительностей межпульсовых интервалов от частоты). Полученные данные показывают, что у обследуемых со значительной степенью поражения коронарных артерий, максимум спектральной мощности на частоте 0,1 Гц менее выражен по сравнению с обследуемыми без гемодинамически значимого стеноза.

На рис. 4 приведены графики типа прямоугольник с ответвлениями (Box-and-Whisker plot), на котором указаны медиана (средняя линия прямоугольника), 75 % и 25 % перцентили (верхняя и нижняя сторона прямоугольника соответственно),

максимальные и минимальные значения (верхняя и нижняя черта соответственно) для коэффициентов k_1 и k_2 , определенных у двух групп обследуемых. Средние значения показателя k_1 и k_2 для I группы ($1,44 \pm 1,05$; $13,74 \pm 5,07$); для II группы ($-2,08 \pm 1,8$; $-21,22 \pm 9,36$). Полученные данные свидетельствуют о существенных и значимых различиях ($p < 0,05$) в значениях показателей k_1 и k_2 для двух групп людей – без стеноза (группа I) и с гемодинамически значимым стенозом (группа II). При этом значения показателя k_2 имеют больший интерквартильный размах, чем значения показателя k_1 для обеих групп обследуемых.

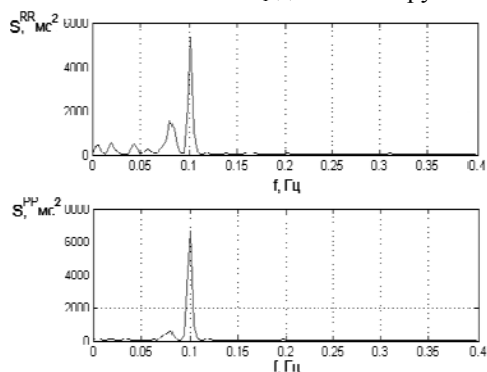


Рис. 2. Обследуемый М., 22 года (KIS=0)

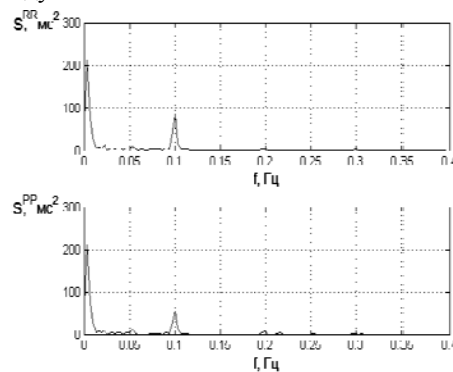


Рис. 3. Обследуемый Ч., 63 года (KIS=11)

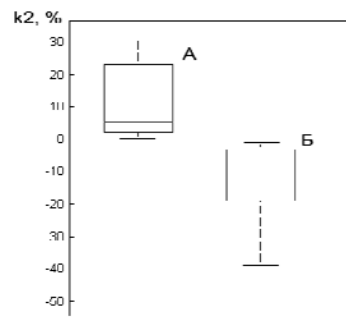
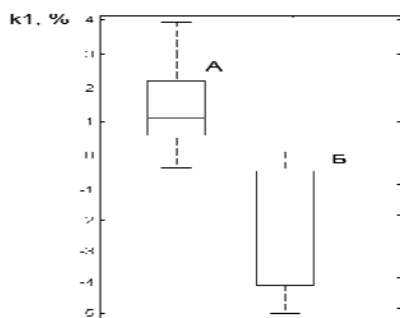


Рис. 4. График (Box-and-Whisker plot) для коэффициента k_1 и k_2 пациентов I группы (А) и II группы (Б)

Для показателей k_1 и k_2 были определены значения чувствительности и специфичности. В качестве метода “золотого стандарта” использовались результаты, полученные в ходе проведения коронарографии у обследуемых. В качестве классификатора, относящего обследуемого к одной из двух групп – группе I (отсутствие стеноза) или группе II (наличие стеноза) нами использовался простой пороговый уровень. На основе полученных данных в качестве такого порога для обоих диагностических показателей k_1 и k_2 было выбрано значение, равное нулю. Таким образом, если значение показателя k_1 или k_2 превышали пороговый уровень, то обследуемого относили к группе I, если нет – группе II. Для полученных показателей нами были рассчитаны значения чувствительности и специфичности (табл. 1): диагностический показатель k_2 имеет более высокую чувствительность и специфичность, чем показатель k_1 .

Таблица 1

Чувствительность и специфичность диагностических показателей k_1 и k_2

Диагностический показатель	Чувствительность S^+ , %	Специфичность S^- , %
k_1	79	82
k_2	88	86

Проведенная клиническая апробация разработанной методики обработки биосигналов показала ее эффективность для решения задач экспресс-контроля эластичности артериальных сосудов человека. Использование созданной методики обработки биосигналов сердечного ритма в составе системы контроля состояния коронарных артерий позволяет достичь следующих результатов:

- ◆ Повышается оперативность диагностики нарушений коронарных артерий человека на ранних стадиях развития патологии.
- ◆ Появляется возможность создания эффективной методики неинвазивной оценки состояния коронарных артерий без необходимости проведения опасных и сложных хирургических операций.

Простота и доступность осуществляемых диагностических процедур благоприятствует внедрению методики биосигналов сердечного ритма и делает его перспективным в плане повсеместного использования в кардиологической практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедев П.А., Лебедева Е.П., Дуляков Д.В., Калакутский Л.И., Федотов А.А. Возможность оценки атеросклеротического ремоделирования коронарных артерий посредством анализа спектральных различий вариабельности сердечного и пульсового ритмов // Артериальная гипертензия – 2011. – Т. 17, № 5. – С. 1-7.
2. Киселев А.Р., Гриднев В.И. и др. Динамики мощности низко- и высокочастотного диапазонов спектра вариабельности сердечного ритма у больных ишемической болезнью сердца с различной тяжестью коронарного атеросклероза в ходе нагрузочных проб // Физиология человека. – 2008. – Т. 34, № 3. – С. 57-64.
3. Zemitute D. Autonomic heart rate control and location of coronary artery stenosis // Biomedicine. – 2002. – Vol. 2, № 1. – P. 2-14.
4. Киселев А.Р., Беснятов А.Б. и др. Внутренняя синхронизация основных 0,1 Гц частотных ритмов в системе вегетативного управления сердечно-сосудистой системой // Физиология человека. – 2007. – Т. 33, № 2. – С. 69-75.
5. Gensini G.G. Coronary arteriography: role in myocardial revascularization // Postgraduate Medicine. – 1978. – Vol. 63 (1). – P. 133-138.
6. Гуржин С.Г., Калакутский Л.И., Федотов А.А. Методика оценки эластических свойств сосудов на основе анализа вариабельности сердечного ритма // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2010. – № 8. – С. 54-59.
7. Мамий В.И. Спектральный анализ и интерпретация спектральных составляющих колебаний ритма сердца // Физиология человека. – 2006. – Т. 32 (2). – С. 1-9.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Е. Высоцкий.

Калакутский Лев Иванович – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева; e-mail: bme@ssau.ru; 443086 г. Самара, Московское шоссе, 34; тел.: 88462674549; кафедра радиотехники и медицинских диагностических систем; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Федотов Александр Александрович – e-mail: fedoaleks@yandex.ru; 443114, г. Самара, пр-т Кирова, 303-11; тел.: 88469277668; кафедра радиотехники и медицинских диагностических систем; инженер; аспирант.

Лебедева Екатерина Петровна – Самарский государственный медицинский университет; e-mail: milaorion@mail.ru; 443099, г. Самара, ул. Чапаевская, 89; тел. +78462674549; ординат.

Kalakutskiy Lev Ivanovich – Samara State Aerospace University; e-mail: bme@ssau.ru; 34, Moscow highway, Samara, 443086, Russia; phone: +78462674549; the department of radioengineering and biomedical engineering; the head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Fedotov Aleksandr Aleksandrovich – e-mail: fedoaleks@yandex.ru, 303-11, Kirova avenue, Samara, 443114, Russia; phone: +78469277668; the department of radioengineering and biomedical engineering; engineer; post graduate student.

Lebedeva Ekaterina Petrovna – Samara State Medical University; e-mail: milaorion@mail.ru; 89, Chapaeva street, Samara, 443099; Russia; phone +78462674549: intern.

УДК 621.317.332: 616-073.7

А.В. Киреев

**ОБ УСЛОВИЯХ СЪЁМА ПЕРВИЧНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
ИНФОРМАЦИИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ
БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ**

Сформулированы требования, предъявляемые к точности измерения параметров импеданса на поверхности тела с позиции визуализации пространственного распределения электропроводности внутренних тканей и органов. Выделены основные факторы, ограничивающие точность измерения импеданса и установлена их взаимосвязь с результирующей погрешностью измерений. Получена оценка предельно достижимой точности измерения импеданса корреляционным методом и определены оптимальные параметры измерительной системы, обеспечивающие её достижение. Предложен способ учёта нестационарности импеданса с помощью сглаживающих окон полиномиального скользящего среднего, позволяющий дополнительно повысить точность измерения импеданса.

Томография; импеданс; погрешности; нестационарность; сглаживание.

A.V. Kireev

**ABOUT CONDITIONS OF OBTAINING PRIMARY MEASURING
INFORMATION USED AT RECONSTRUCTION OF SPATIAL DISTRIBUTION
OF AN ELECTRIC IMPEDANCE OF BIOLOGICAL FABRICS**

The requirements shown to accuracy of measurement of parameters of an impedance on a surface of a body from a position of visualization of spatial distribution of an elektroprovodnost of internal fabrics and bodies are formulated. The major factors limiting accuracy of measurement of an impedance are allocated and their interrelation with a resultant error of measurements is established. The mark of extremely achievable accuracy of measurement of an impedance is received by a correlation method and the optimum parameters of measuring system providing its achievement are defined. The way of the accounting of a nestatsionarnost of an impedance by means of smoothing windows of the polinomialny sliding average is offered, allowing in addition to increase accuracy of measurement of an impedance.

Tomography; impedance; errors; nonstationarity; smoothing.

Идея получения пространственного распределения электропроводности биологических тканей по результатам измерения потенциалов на поверхности тела, возбуждаемых внешним источником электрического тока, весьма привлекательна, так как она является основой для создания новых, абсолютно безвредных для организма, диагностических приборов. Сравнительно низкая себестоимость в сочетании с их удобством и оперативностью потенциально делают область применения таких приборов очень широкой. Однако ряд объективных препятствий, связанных с достижением приемлемой информативности измерений, а также отсутствие алгоритмов, дающих удовлетворительные результаты реконструкции распределения