

В.Н. Бережной, М.С. Захаров, С.М.Захаров

Профилактика здоровья человека на основе спектрального анализа фотоплетизмограмм и статистических показателей стандарта измерения variability сердечного ритма .

Аннотация

В работе представлена методология по раннему предупреждению заболеваний человека на основе спектрального анализа фотоплетизмограммы (ФПГ) или пульсовой волны первого порядка и статистических показателей стандарта измерения variability сердечного ритма (BCP). На спектрограммах Фурье ФПГ обнаружены явления согласования частот (для здорового человека) и рассогласования частот (для лиц с признаками заболевания) на фоне существенно меняющихся статистических данных математического анализа BCP. Указанные маркеры стандарта измерения BCP и спектральная особенность частот ФПГ могут оказаться полезными для диагностики заболеваний на ранних стадиях.

Ключевые слова: здоровье, нарушение, профилактика, болезнь, пульс, BCP.

Abstract

At the article is presented the methodology for early prevention of human diseases based on the spectral properties of the photoplethysmogram (PPG) or pulse wave first order and statistical figures of HRV method. The phenomenon of the matching frequencies (for a healthy person) and mismatch frequencies (for persons with signs of disease) is observed in the Fourier spectrogram PPG against the backdrop of significantly changing statistics HRV. These markers of method HRV and spectral features frequencies are based on PPG could be useful for diagnosis of diseases in the early stages.

Keywords: Health, Disorders, Prevention, disease , HRV. pulse .

Введение

Целью настоящей работы является создание доступной технологии по раннему предупреждению заболевания человека на основе спектрального анализа пальцевых фотоплетизмограмм (ФПГ) и статистических показателей variability сердечного ритма (BCP) [1,2] .

Метод измерения ВСР, основанный на регистрации электрической активности миокарда, был предложен в свое время в ИМБП РАН Баевским Р.М. и до сих пор служит средством определения функционального состояния космонавтов. Получение информации о деятельности сердца средствами ФПГ в ИМБП РАН также применяется для исследования параметров психофизиологического состояния операторов, временных и в том числе спектральных свойств кардиоинтервалов методики измерения ВСР.

Метод ВСР с технологией ФПГ в РФ получил распространение в системе Российских Железных Дорог (РЖД), в предсменном контроле персонала на предприятиях электроэнергетики, на атомных станциях, в космических исследованиях (ИМБП РАН - МАРС-500), в учебных заведениях всех уровней, в спорте, у населения.

В сигнале ФПГ содержится информация не только о длительности сердечных сокращений, но и другая, присущая пульсовой волне, что позволяет создать Фурье спектр ФПГ. Данный спектр не может быть получен при измерении временных интервалов между ударами сердца методом электрокардиографии (ЭКГ), и теперь он служит основой, как мы полагаем, позволяющей диагностировать начальные стадии нарушений состояния здоровья человека,.

Поскольку электрическая активность сердца всегда связана с изменением объёма кровенаполнения сосудов, приводящим к изменению оптической плотности тканей, то для получения информации о сердечной деятельности вместо традиционной ЭКГ предлагается снимать пальцевую ФПГ.

Измерения и анализ результатов для настоящей работы выполнялись аппаратно -программным комплексом «БиоМышь» компании НейроЛаб Москва (рисунок 1), состоящего из обычной компьютерной мыши со встроенной интерактивной функцией регистрации и предварительной обработки ФПГ сигнала.

Являясь компьютерным манипулятором, БиоМышь снабжена инфракрасным сенсором регистрации пульсовой волны с большого пальца руки человека и каналом передачи данных ФПГ сигнала со следующими параметрами:

Частота оцифровки сигнала	366 Гц
Полоса частот пропускания	0.8 ... 20 Гц
Интерфейс	USB 1.1
Разрядность передаваемых в ПК данных (АЦП/PWM):	10 / 14
Занимаемая полоса USB:	~820 б/с

Размер внутреннего буфера для передачи в USB: 800 байт / 400 отсчетов / ~1.1 секунды

Покрытие контуром обратной связи диапазона PWM: ~98% / 0.7..2.7 В

Устройство с подобными характеристиками и соответствующим программным обеспечением (ПО) позволяет получить ФПГ сигнал высокого разрешения, производить не только стандартное измерение и математическую оценку ВСР, но и анализировать временную форму пульсовой волны.



Рисунок 1. Аппаратно – программный комплекс «Биомышь» (ООО НейроЛаб, Москва), используемый в настоящей работе (Chinese Patent No.: 200630130118.2).

Основная часть

Мы остановимся в основном на спектральных особенностях сигналов ПВ, полученных методом фотоплетизмографии (пример пальцевой ФПГ показан на рисунке 2).

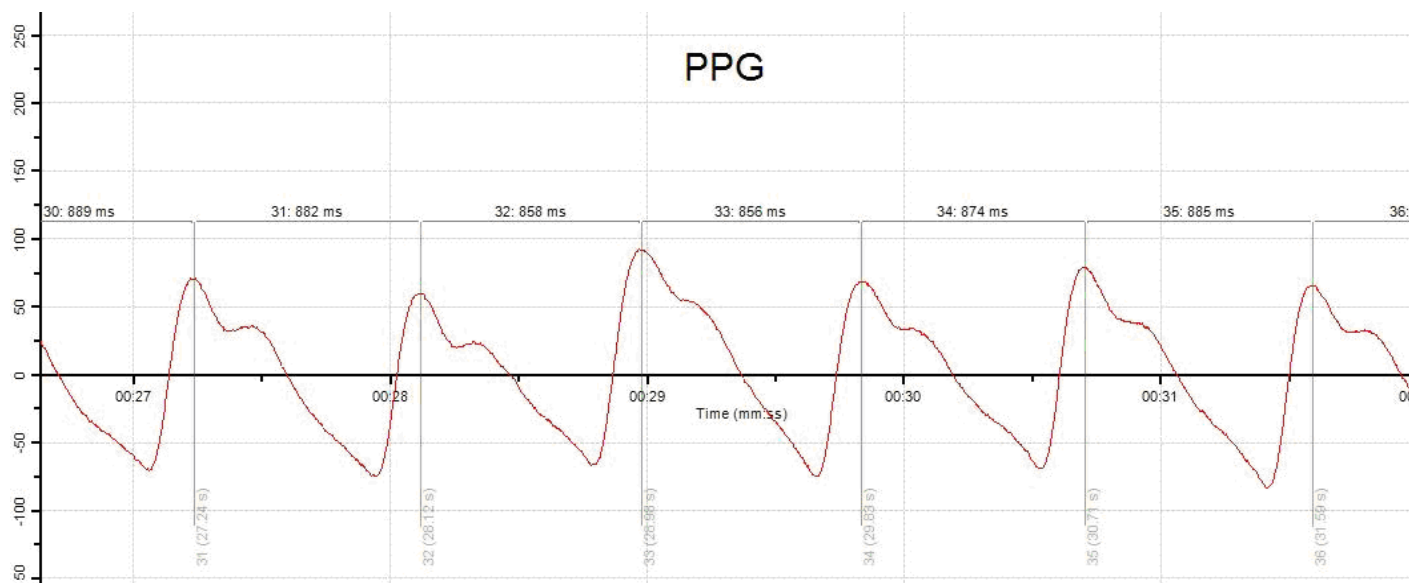


Рисунок 2. Типовой ФПГ сигнал.

Метод фотоплетизмографии, реализованный в АПК «БиоМышь» компании «НейроЛаб», позволяет получать всю информацию, относящуюся к стандарту

исследования ВСР. Кроме того, ФПГ технология съёма информации о ритме крови предоставляет дополнительные возможности, связанные с исследованием временной формы сигнала пульсовой волны. Для этой цели строится спектр Фурье всей последовательности сигналов ПВ [3]:

$$F(\nu) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \exp\left(-\frac{2\pi i \nu j}{n\text{ud}}\right) x_j$$

Здесь суммирование производится по всем N временным отсчетам x_j , ν – частота, $n\text{ud}$ – частота дискретизации в Гц.

На рисунке 3 представлен Фурье спектр ФПГ здорового человека, который был получен из обычного вида ФПГ сигнала (рисунок 2) и который также можно назвать типовым или нормальным. Как видно, спектр представляет собой вполне упорядоченную структуру и состоит из отдельных гармоник в диапазоне 1-10 Гц. (их количество может достигать 7 – 8 и более) с частотами, кратными основной частоте сердечного ритма (~ 1 Гц), и своеобразными «обертонами» (на кратных частотах). Для нормального спектра сигнала ФПГ, амплитуды гармоник, кратных основной частоте убывают по экспоненте.

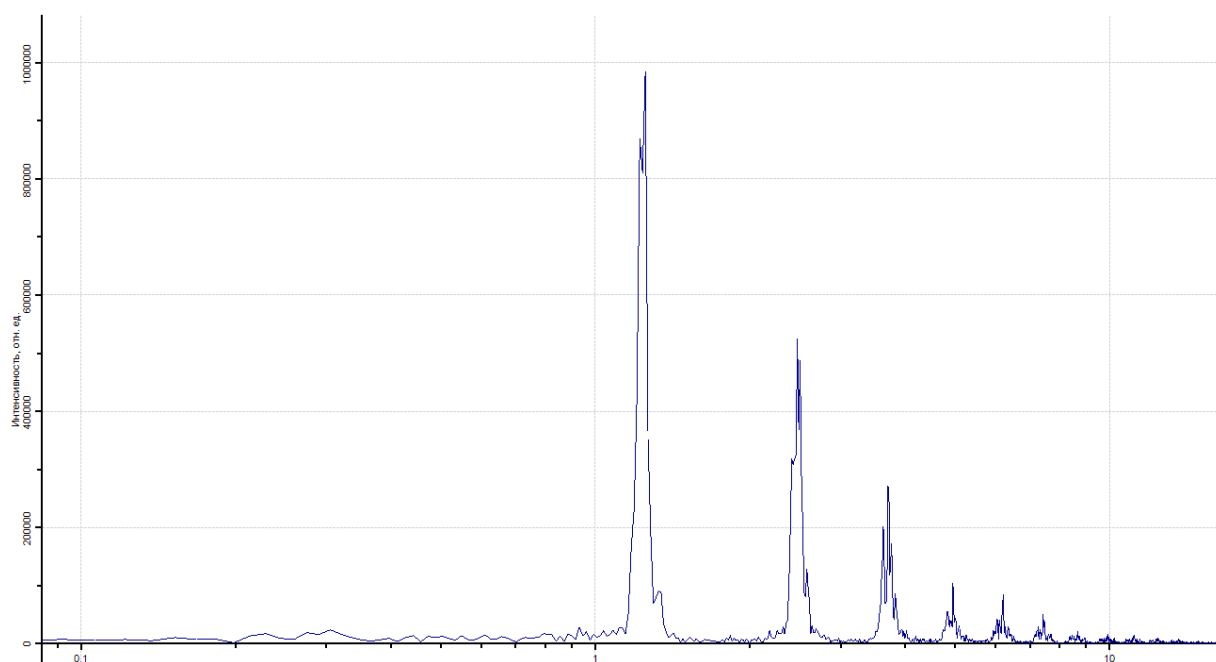


Рисунок 3. Фурье спектр сигнала ФПГ человека без патологических отклонений.

Можно говорить о различных частотных диапазонах, играющих важную роль в функционировании живого организма. Для нас значимым является диапазон частот от сотых и тысячных долей Гц вплоть до десятков Гц. При этом область до 1 Гц мы будем называть низкочастотной, а область выше 1 Гц – высокочастотной.

Каждый из пиков спектрограммы может характеризоваться своеобразной «тонкой» структурой, обусловленной взаимодействием высоких и низких частот. В этом можно убедиться, растянув спектр Фурье по частоте (рисунок 4).

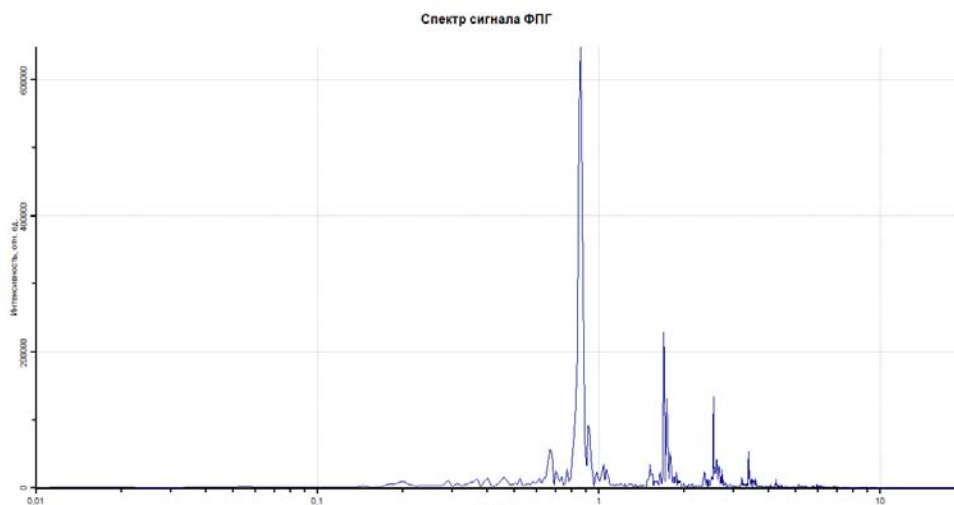


Рисунок 4. «Тонкая» структура спектра Фурье сигнала ПВ.

В свое время выдающимся физиологом XX века Петром Кузьмичом Анохиным был сформулирован принцип оптимального функционирования организма, как единого целого [5]. Для здорового человека при этом должны быть выполнено определенное частотное «согласование» ритмов работы сердца и других органов (печень, легкие, почки и т.д.) соотношения работы которых кратны друг другу с некоторым рациональным коэффициентом. Частотное согласование уменьшает ненужные потери энергии в организме.

Известно, что регистрация электромагнитного поля (ЭМП) человека и в частности сердца была проведена на экспериментальной базе Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии, и признана как существующий факт [4]. Согласование ритмов работы внутренних органов влечет согласование ритмов работы их ЭМП.

Следовательно, сигнал ФПГ фиксирует находящиеся в динамике тока крови периодические процессы функционирования организма в виде преобразованных колебаний электромагнитных полей в том числе. Аппаратным образом мы регистрируем не сами процессы, а их отраженный сигнал в ритме крови, и частотный спектр ФПГ по сути, является спектром ЭМП человека в том числе.

В настоящей работе были получены и проанализированы более трех тысяч спектрограмм Фурье ФПГ сигнала (это не число пациентов) на временном промежутке, соответствующем ста сердечным ритмам. При этом обнаружены

явления «согласования» и «рассогласования» отдельных Фурье частот. Проведено сравнение спектрограмм и отмечены характерные признаки, отличающие здорового человека от пациентов с развивающейся патологией.

Анализ полученных данных позволил определить, что рассматриваемый спектр Фурье ФПГ сигнала присущ любому живому человеку и в зависимости от состояния здоровья и наличия воздействий может изменяться, но имеет весьма устойчивую структуру и внешний вид высокочастотной области.

Явления психоэмоционального напряжения, обусловленные стрессом, могут вызвать устойчивые нарушения циклов жизнедеятельности некоторых важных органов, и соответственно вызвать частотное рассогласование их работы. Поэтому основным показателем начальной стадии функциональных или иных нарушений состояния здоровья является отклонение от нормы характеристик типовой ФПГ.

На рисунке 5. наблюдаются **нарушения цикличности** (периодичности) и обычного вида **ФПГ** сигнала.

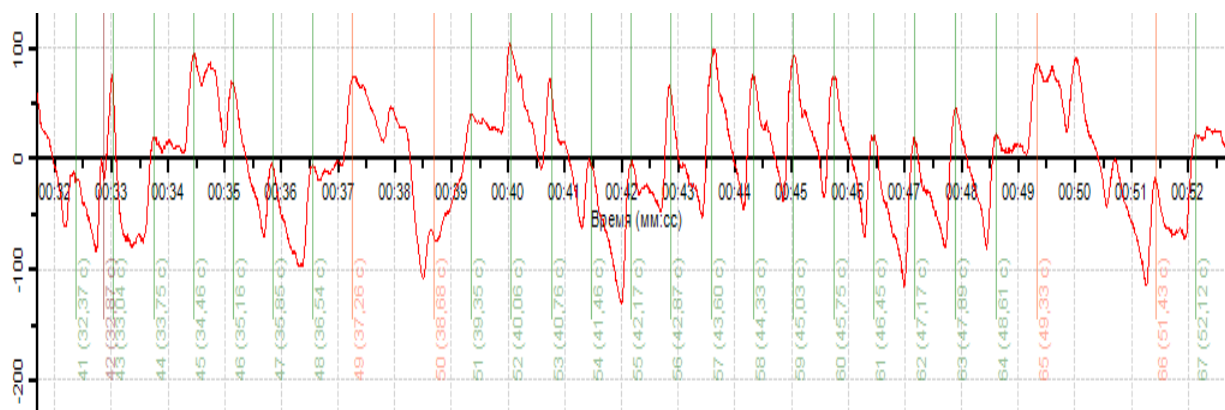


Рисунок 5. Нетиповой сигнал 1 ФПГ.

Нетиповой спектр Фурье сигнала ФПГ может возникать у пациентов, не испытывающих субъективных ощущений, что затрудняет диагностику заболевания традиционными методами для сопоставления полученных результатов.

В частности, такой пример спектров Фурье представлен ниже (рисунок 6), полученный из сигнала на рисунке 5. Частотные спектры ФПГ устойчивы, хаос там не выражен, но возникает структурная неупорядоченность, и вторая гармоника спектра указывает на признаки отклонения от нормы в состоянии здоровья пациента. Только это изменение спектра Фурье сигнала ФПГ во времени отражает начавшиеся изменения на субклеточном уровне органа.

Благодаря работам Рудольфа Вирхова крупнейшего немецкого ученого 18 века., доказано, что любой патологический процесс начинается на уровне ультраструктур

клеток, то есть субклеточном уровне. При патологии клетки все ее ультраструктуры, начинают увеличиваться или уменьшаться в объеме в том числе, вызывая изменение частоты колебания ЭМП клеточных коопераций органа. Компоненты спектра Фурье сигнала ФПГ начинают смещаться по шкале частот, создавая не гармоничную структуру. Отдельные гармоники – «зашумлены», или представлены новыми частотными составляющими, которые образовались в связи с возникновением новых колебаний в организме. Что характерно - число гармоник, имеющих заметную мощность - уменьшается.

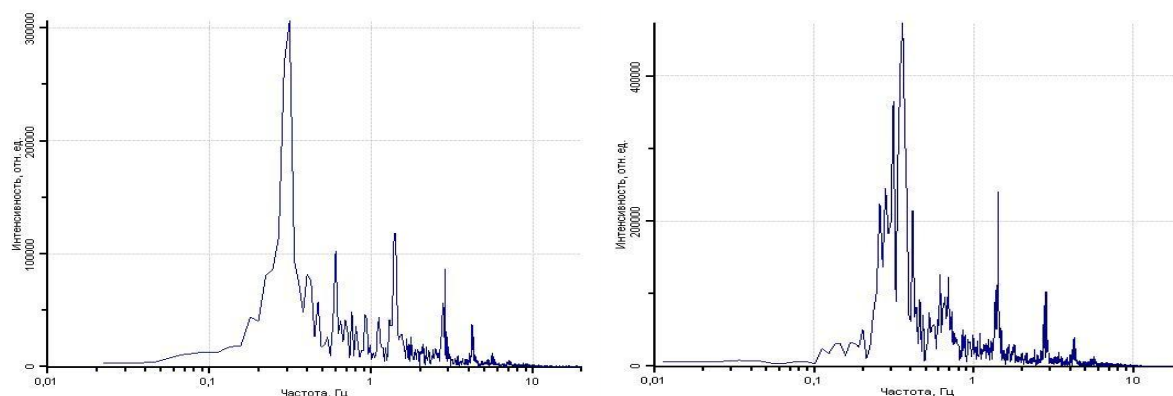


Рисунок 6. Спектрограммы ПВ пациента 1 с патологией, записанные с интервалом 6 минут, пациент не чувствует признаков заболевания.

На следующем рисунке 7. наблюдаются более существенные отклонения от стандартного вида **ФПГ** сигнала.

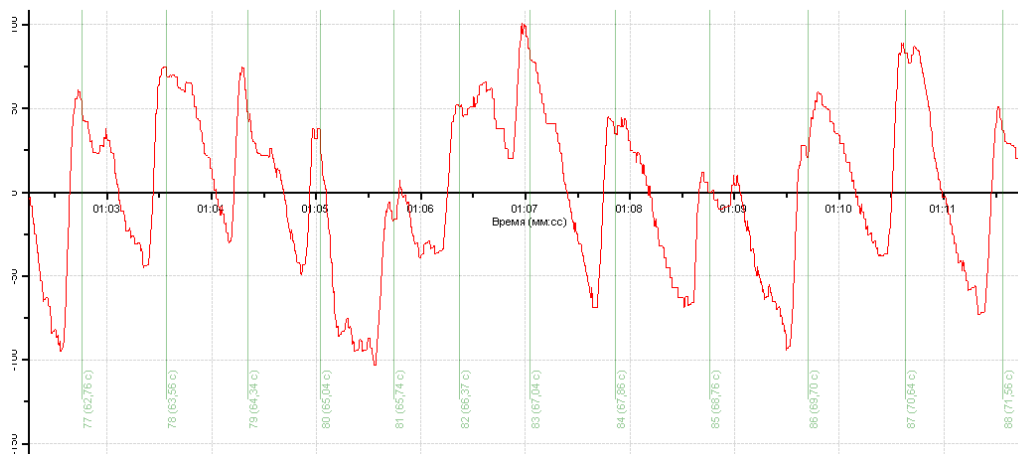


Рисунок 7. Нетиповой сигнал 2 ФПГ

В случае развития патологии, динамика во времени Фурье спектра ФПГ, полученного из нетипового сигнала, носит достаточно хаотический характер. Причем, данный характер относится как к положению отдельных спектральных компонент на шкале частот, так и к их интенсивностям, представленным ниже. Таким образом, нарушаются корреляционные отношения ритмов деятельности организма.

На следующем рисунке 8 представлен нетиповой спектр Фурье ФПГ, полученный из сигнала на рисунке 7. Как видно, данный спектр уже не является той упорядоченной структурой, какую мы видели ранее. Данную картину можно назвать «рассогласованием частот». Таким образом, основной составляющей предлагаемого метода диагностики заболевания является анализ сигнала и спектра ФПГ, который в норме имеет типовой вид (рисунок 2 и 3), а в случае возникновения не нормы (включая патологию) вид сигнала и спектра ФПГ не выглядит таковым, при этом проявляются структурная неупорядоченность, хаотичность и зашумленность последнего.

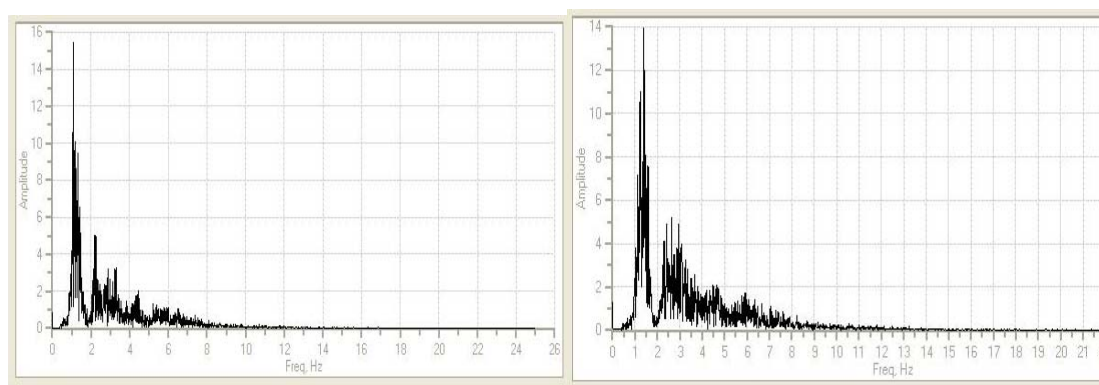


Рисунок 8. Спектрограммы ПВ пациента 2 с патологией (интервал между спектрограммами составляет 6 минут), пациент чувствует заболевание.

О приведенных в работе примерах диагностики пациентов известно, что в первом случае пациент (с частично удаленной щитовидной железой) не испытывал болевых ощущений, которые обычно являются поводом обращения к врачам. Во втором случае у пациента постоянно возникали кисты в разных местах, пациент чувствовал заболевание, причину которого современная медицина установить не смогла.

Временной промежуток между измерениями пациентов позволяет воспроизводить результаты диагностики на одних и тех же пациентах при повторных исследованиях.

Представляет также интерес количественная оценка структурной упорядоченности или разупорядоченности спектров Фурье сигналов ФПГ. Для этой цели воспользуемся классическим выражением для информационной энтропии H , предложенным в теории информации К.Шенноном:

$$H = -\sum_i p_i \log_2 p_i,$$

где p_i – вероятности появления i – го символа в сообщении.

Применительно к нашему случаю, суммирование должно производиться по всем спектральным компонентам (частотам), а вероятность p_i будет определяться амплитудой i – ой компоненты:

$$p_i = A_i / \sum_i A_i.$$

Таким образом, введенная энтропия обладает очевидными свойствами: $H_{\min} = 0$, $H_{\max} = \log_2 NF$, где NF - полное число всех спектральных компонент. Поскольку исходная запись кардиоинтервалов осуществлялась по 100 сердечным циклам и спектральное разрешение составляло значение порядка 0,01 Гц, то NF выбиралось равным 300. Тогда $H_{\max} = 8,23$.

Для спектров здоровых людей рассчитанные значения H попадали в интервал $H = 2,0 - 3,5$. Для пациентов с отклонениями от здорового состояния $H = 5,0 - 7,0$. Таким образом, по значению H можно судить о структурной упорядоченности спектров Фурье сигналов ФПГ.

В случае заболевания могут существенно меняться и статистические показатели стандартного исследования ВСР :

- дисперсия (в норме 600-900 мс²) выходит за пределы 2-х, 3-х тысяч и может достигать десятков тысяч;
- коэффициент вариации (норма 3-5 %) может увеличиться до 10 раз;
- индекс напряжения (норма до 150-250) может уменьшиться до 10 раз;
- индекс функционального состояния может увеличиться от единицы до нескольких десятков и выше;
- психофизиологическая цена уменьшается в несколько раз, и стремится от тысяч к сотням.

Таким образом, выдвигается **гипотеза**, которая заключается в следующем: нарушение стандартного вида ФПГ сигнала, вызвавшее структурную неупорядоченность в спектре ФПГ и существенно изменившиеся перечисленные статистические параметры стандарта исследования ВСР позволяют диагностировать начальные признаки заболевания человека без каких-либо болевых симптомов вначале.

Выводы

Технология ФПГ и стандартные исследования ВСР теперь позволяют контролировать не только функциональное состояние человека, но и производить качественную оценку состояния здоровья, как мы полагаем.

Предлагаемый метод может применяться для выявления диагностических ошибок первого и второго рода при массовых обследованиях, что вполне достижимо учитывая технологию проведения диагностики и стоимость прибора.

При этом появляется возможность для:

- оказания услуг удаленной медицинской диагностики и удаленных консультаций со специалистами на базе интернет - технологий;
- создания региональных, национальных и глобальных баз данных о здоровье населения.

Внедрение описанной выше технологии контроля состояния человека позволит создать предупреждающую диагностику изменения состояния здоровья людей и снизить вероятность возникновения инцидентов на рабочих местах.

При этом решаются задачи первичной диспансеризации населения без существенных материальных вложений, определяются районы с наиболее неблагоприятными условиями жизни и работы. Выявляется контингент людей для последующего детального обследования.

Как следствие, применение данной технологии населением для контроля здоровья может привести к увеличению продолжительности активной жизни людей и снижению потребления медикаментов, может обеспечить надежность деятельности персонала, минимизировать влияние человеческого фактора в производственной деятельности и технологических процессах.

Список литературы

1. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. «Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе». – М.: Наука, 1984, - 221 с.
2. Баевский Р.М., Берсенева А.П., «Введение в донозологическую диагностику». - М.: Слово, 2008, - 220 с.
3. Бережной В.Н., Захаров М.С., Захаров С.М. «Динамика во времени спектральных особенностей сигналов пульсовой волны, полученных методом фотоплетизмографии». Биомедицинская радиоэлектроника, 2013, №6, с.36-43.
4. К. В. Судаков // Системное построение функций человека 1999, <http://www.galactic.org.ua/Prostranstv/anoxin-5.htm>
5. Ю.А. Холодов, А.Н. Козлов, А.М. Горбач. Магнитные поля биологических объектов. Москва.: «Наука», 1987.

Бережной Валерий Николаевич,

Генеральный директор ООО «НейроЛаб», Москва, 111024, Андроновское ш-се, д.26, стр.2

Сл. Тел.:8(901) 522-84-62, Моб. Тел.: 8(916) 532-11-32

Захаров Михаил Сергеевич,

Начальник Управления ЗАО «Сбербанк - Технологии», Москва, 117105, Новоданиловская набережная, д. 10

Сл. Тел.: 8(495) 580-44-17, Моб. Тел.: 8(916) 681-74-41

Захаров Сергей Михайлович,

профессор, д.ф.–м.н., главный научный сотрудник ОАО Института электронных управляющих машин им. И.С. Брука (ИНЭУМ), Москва, 117334, ул. Вавилова, д.24
Дом. тел.: (499) 138-32-79, моб.: 8-916-522-93-57