

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СФИГМОГРАММЫ

Хе Ши

канд. физ.-мат. наук, доцент
кафедра электронных информационных наук
Университет Шанглуо
ул. Бейксин, 10, г. Шанглуо, 726000,
провинция Шаанкси, Китай
e-mail: 230058@sxxy.edu.cn
ORCID 0000-0003-4999-1055

С.Н. Шульга

д-р физ.-мат. наук, проф., декан
радиофизический факультет
Харьковский национальный университет
имени В.Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
тел.: +38 (057) 707-54-62
e-mail: sergeyshulga@karazin.ua
ORCID 0000-0003-0626-4405

Н.Г. Кокодий

д-р физ.-мат. наук, проф.
кафедра квантовой радиофизики
Харьковский национальный университет
имени В.Н. Каразина;
кафедра физики
Национальный фармацевтический университет
ул. Пушкинская, 53, г. Харьков, 61022, Украина
тел.: +38 (050) 637-54-04
e-mail: kokodiyng@gmail.com
ORCID 0000-0003-1325-4563

В.А. Тиманюк

канд. физ.-мат. наук, проф.
кафедра физики
Национальный фармацевтический университет
ул. Пушкинская, 53, г. Харьков, 61022, Украина
тел.: +38 (095) 505-39-19
e-mail: vladimir.timaniuk@gmail.com
ORCID 0000-0003-0689-6074

Актуальность. Сердечно-сосудистая система играет важную роль в организме человека. Поэтому одной из важных задач медицины является контроль состояния этой системы. Один из известных методов контроля — *электрокардиография*. Другой путь изучения ее состояния — *кардиоинтервалография*. Она изучает изменения сердечного ритма как реакцию организма на внешние воздействия. *Сфигмография* — метод графической регистрации пульсовых колебаний кровеносных сосудов. Сфигмограммы регистрируют с помощью датчиков, установленных на участках тела с отчетливо выраженной пульсацией крови — на сонной, подключичной, бедренной и лучевой артериях. Полученные данные позволяют судить об атеросклерозе определенных участков сосудов, гипертонической болезни и ряде других патологических процессов, при которых нарушается эластичность сосудов. Светодиодная и лазерная техника позволила существенно упростить систему регистрации сфигмограммы и сделать процесс ее получения более надежным. Устройство представляет собой систему светодиод-фотодиод, между которыми располагается исследуемый объект — палец руки. Сигнал формируется благодаря изменению объема крови в месте индикации при прохождении пульсовой волны.

Цель работы. Получить информацию и провести ее анализ с помощью исследования спектра сигналов сфигмограммы с оптического датчика, который содержит информацию о форме импульсов и интервалах между ними. Эти сигналы содержат больше информации, чем кардиоинтервалограмма и спектр одного импульса.

Методы. Кроме статистического анализа для изучения кардиоинтервалограмм и сфигмограмм применяется спектральный анализ. Он состоит в вычислении основной частоты и высших гармоник сигнала и оценки энергетического вклада каждой из них.

Результаты. Спектр низкочастотного участка содержит информацию о медленных волнах сердечной деятельности. Полный спектр сфигмограммы содержит информацию о частоте работы сердца и о более высоких гармониках.

Заключение. Проведен анализ работы сердца по спектру кардиоинтервалограммы и по спектру сфигмограммы. Второй способ позволяет получить более подробную информацию о состоянии здоровья человека.

Ключевые слова: сфигмограмма, спектральный анализ, оптико-электрический датчик.

SPECTRAL ANALYSIS OF SPHYGMOGRAM

He Shi¹, N.G.Kokodii^{2,3}, S.N. Shulga², V.A. Timaniuk³

¹Shangluo University, Shangluo City, Shaanxi Province, China;

²V.N. Karazin Kharkov National University, Kharkov, Ukraine;

³National University of Pharmacy, Kharkov, Ukraine

Actuality. The heart system executes the important role in the organism. It is important task of medicine to diagnose of the state of this system. *Electrocardiogram* is the one of methods of control its state. *Cardiointervalgram* is another way of study of the state of the heart system. I studies the change of rhythm of heart as reaction of organism on external influences. *Sphygmography* is a method of graphical recording of

pulse fluctuations of blood vessels. Sphygmograms are recorded using sensors installed on areas of the body with a distinct pulsation of blood - on the carotid, subclavian, femoral and radial arteries. The data obtained allow us to judge the atherosclerosis of certain sections of blood vessels, hypertension and a number of other pathological processes in which the elasticity of the vessels is impaired. LED and laser technology allowed us to significantly simplify the registration system of the sphygmogram and make the process of obtaining it more reliable. The device is a system of LED-photodiode, between which the studied object is located - the finger of the hand. The signal is formed due to a change in the volume of blood in the place of indication during the passage of the pulse wave.

Purpose of work. The spectral analysis of the sphygmogram impulses gives the information about heart system. The spectrum of sphygmogram of healthy man is wider. Numerical coefficients, which are characterizing correlation high and low frequencies, are offered. This was offered to analysis the spectrum of signal from the optical sensor, which is containing information by the of impulses and cardiointervals. These signals contain more information, than cardiointervalgram and single impulse of sphygmogram only.

Methods. In addition to statistical analysis, spectral analysis is also used to study cardiointervalgrams and sphygmograms. It consists in calculating the fundamental frequency and higher harmonics of the signal and estimating the energy contribution of each of them.

Results. The spectrum of cardiointervalgram contains information about the slow waves of heart work. The spectrum of sphygmogram contains information about frequency of heart work and about higher frequencies also.

Conclusion. The analysis of heart work was made by the spectrum of cardiointervalgram and on the spectrum of sphygmogram. The second method allows to obtain more information about health of man.

Key words: sphygmogram, spectral analysis, optics-electronic sensor.

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СФІГМОГРАМИ

Хе Ші¹, М.Г. Кокодій^{2,3}, С.М. Шульга², В.О. Тіманюк³

¹Університет Шанглоу, м. Шанглоу, Китай;

²Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків, Україна;

³Національний фармацевтичний університет, м. Харків, Україна

Актуальність. Серцево-судинна система відіграє важливу роль в організмі людини. Тому одним із важливих завдань медицини є контроль стану цієї системи. Один з відомих методів контролю — *електрокардіографія*. Інший шлях вивчення її стану — *кардіоінтервалографія*. Вона вивчає зміни серцевого ритму як реакцію організму на зовнішні впливи. *Сфігмографія* — метод графічної реєстрації пульсових коливань кровоносних судин. Сфігмограми реєструють за допомогою датчиків, встановлених на ділянках тіла з чітко вираженою пульсацією крові — на сонній, підключичній, стегновій і променевої артеріях. Отримані дані дозволяють судити про атеросклероз певних ділянок судин, гіпертонічну хворобу і ряд інших патологічних процесів, при яких порушується еластичність судин. Світлодіодна і лазерна техніка дозволила істотно спростити систему реєстрації сфігмограм і зробити процес її отримання більш надійним. Пристрій являє собою систему світлодіод-фотодіод, між якими розташовується досліджуваний об'єкт — палець руки. Сигнал формується, завдяки зміні обсяга крові в місці індикації при проходженні пульсової хвилі.

Мета роботи. Одержати інформацію і провести її аналіз за допомогою дослідження спектра сигналів сфігмограмми з оптичного датчика, який містить інформацію про форму імпульсів і інтервали між ними. Ці сигнали дають більше інформації, ніж кардіоінтервалограмми і спектр одного імпульсу.

Методи. Крім статистичного аналізу для вивчення кардіоінтервалограм і сфігмограм застосовується спектральний аналіз. Він складається в обчисленні основної частоти і вищих гармонік сигналу і оцінки енергетичного внеску кожної з них.

Результати. Спектр низькочастотного участку дає інформацію про повільні хвилі серцевої діяльності. Повний спектр сфігмограми дає інформацію про частоту роботи серця і про більш високі гармоніки.

Висновок. Проведено аналіз роботи серця по спектру кардіоінтервалограмми і по спектру сфігмограми. Другий спосіб дозволяє отримати більш детальну інформацію про стан здоров'я людини.

Ключові слова: сфігмограма, спектральний аналіз, оптико-електричний датчик.

Введение

Сердечно-сосудистая система выполняет важную роль в организме, и поэтому существует необходимость контроля ее состояния. Широко распространенным методом является анализ **электрокардиограммы** — электрических сигналов, генерируемых сердцем. Типичная кардиограмма показана на рис. 1. Она представляет собой по-

вторяющиеся пики *R*, между которыми находятся меньшие по амплитуде пики *P* и *T* и минимумы *Q* и *S*. Каждая их этих точек характеризует определенный цикл деятельности сердечной мышцы [1–4].

Кардиоинтервалография (КИГ) — это другой способ изучения состояния сердечно-сосудистой системы [5, 6]. Она изучает изменение ритма сердца как реакцию организма на внешнее воздействие. Измеряются периоды между пиками

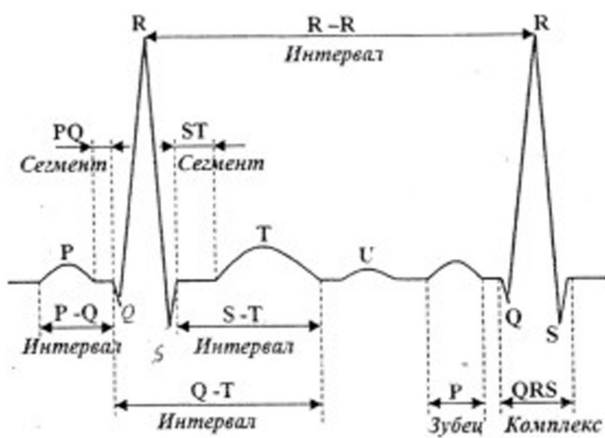


Рис. 1. Кардиограмма

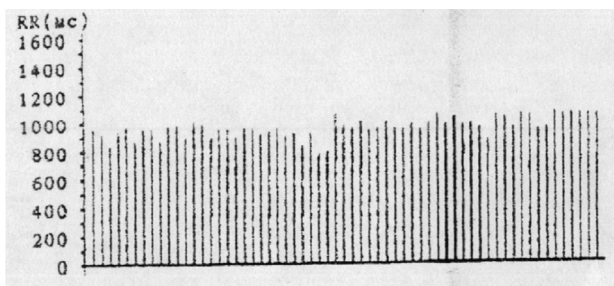


Рис. 2. Кардиоинтервалограмма

кардиограммы. Анализируется изменение периода сигналов сердца с течением времени и строится график этой зависимости (рис. 2).

При статистическом анализе КИГ вычисляются параметры этой зависимости — среднее значение частоты пульса, его вариабельность (дисперсия), симметричность функции распределения частот и др. Они характеризуют состояние исследуемого объекта.

Фото-сфигмография

Сфигмография — это метод измерения пульсовых колебаний сосудов, позволяющий судить об их упруго-вязких свойствах. Сфигмограммы регистрируются с помощью датчиков, установленных на участках тела с отчетливо выраженной пульсацией крови — на сонной, подключичной, бедренной и лучевой артериях. Полученные данные позволяют судить об атеросклерозе определенных участков сосудов, гипертонической болезни и ряде других патологических процессов, при которых нарушается эластичность сосудов.

Ранее чувствительным элементом сфигмографа являлся датчик с рычагом в роли преобразователя. Для преобразования механических сигналов использовались фотоэлектрические,

электромагнитные, пьезокристаллические или тензотрические датчики, а в качестве регистрирующего устройства — электрокардиограф с чернильной записью.

Светодиодная и лазерная техника позволила существенно упростить систему регистрации сфигмограммы и сделать процесс ее получения более надежным. Устройство представляет собой систему светодиод-фотодиод, между которыми располагается исследуемый объект — палец руки. Сигнал формируется благодаря изменению объема крови в месте индикации при прохождении пульсовой волны, которое сопровождается изменением оптической плотности измеряемого участка (рис. 3).

На рис. 4 показан типичный импульс сфигмограммы. На нем выделяются максимум давления

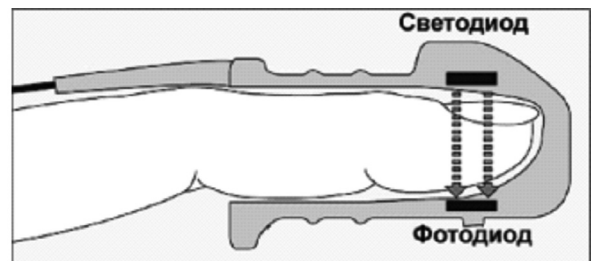


Рис. 3. Оптико-электронный датчик для получения сфигмограммы

крови в прямой пульсовой волне *P* и максимумы давления отраженной от неоднородностей в тракте пульсовой волны *T* и *D*.

При статистическом анализе импульса сфигмограммы измеряются амплитуды прямой и отраженной волн, расстояние между пиками, крутизна нарастания и спада импульса [7].

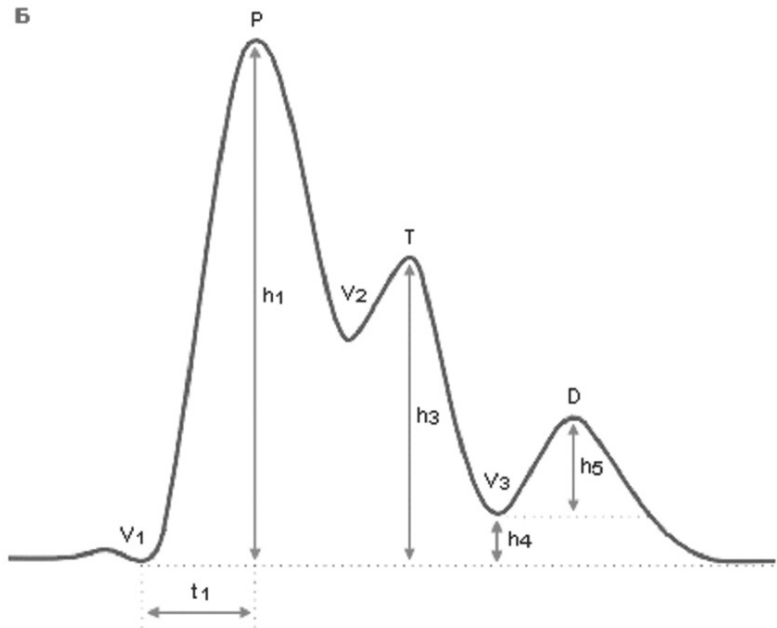


Рис. 4. Импульс сфигмограммы

Спектральный анализ сердечного ритма

Кроме статистического анализа для изучения кардиоинтервалограмм и сфигмограмм применяется спектральный анализ. Он состоит в вычислении основной частоты и высших гармоник сигнала и оценки энергетического вклада каждой из них.

Периодическую функцию $f(t)$ можно представить в виде суммы конечного или бесконечного числа синусоидальных функций с частотами ω , 2ω , 3ω ,... (основная и высшие гармоники) [8]. Если функция задана в интервале времени $0 < t < t_{\max}$, ее можно представить так:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (1)$$

где

$$A_0 = \frac{1}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} f(t) dt,$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad n=1,2,3,\dots$$

$$a_n = \frac{2}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} f(t) \cos(n\omega t) dt, \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{t_{\max}} \int_0^{t_{\max}} f(t) \sin(n\omega t) dt,$$

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{a_n}{b_n}.$$

В эксперименте функция, которую нужно разложить в ряд, получается в дискретном виде. Тогда интегралы (2) превращаются в суммы.

Если значения функции $f(t)$ известны в $N+1$ точке интервала $[0, t_{\max}]$, который разбит на N отрезков длиной $\Delta t = t_{\max}/N$, то:

$$A_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N f(k\Delta t), \quad B_0 = 0,$$

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N f(k\Delta t) \cos \frac{2\pi kn}{t_{\max}}, \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N f(k\Delta t) \sin \frac{2\pi kn}{t_{\max}},$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad n=1,2,3,\dots$$

Важными параметрами при анализе спектра являются число гармоник (максимальная частота) и разрешающая способность по частоте.

Число гармоник, которые можно найти, определяется числом отсчетов функции $f(t)$ и равно $\operatorname{int}(N/2)$, где $\operatorname{int}(x)$ — целая часть числа x . Максимальная частота определяется интервалом Δt и связана с ним формулой

$$f_{\max} = 1/(2\Delta t). \quad (4)$$

Разрешающая способность по частоте определяется временем выборки и равна

$$\Delta f = 1/t_{\max}. \quad (5)$$

Типичные графики спектров кардиоинтервалограммы показаны на рис. 5 [5]. По оси абсцисс отложен период сердечных колебаний в секундах, по оси ординат — спектральная мощность колебаний в условных единицах.

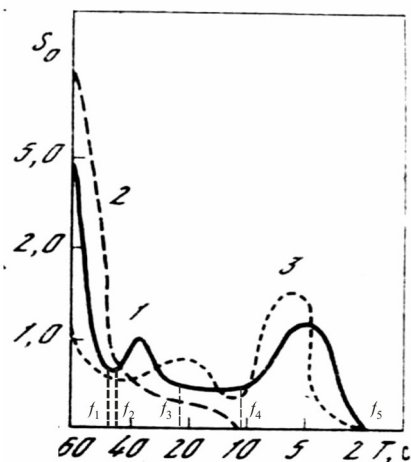


Рис. 5. Спектральная характеристика сердечного ритма
1 — в состоянии покоя, 2 — во время физической нагрузки, 3 — во время сна

При нагрузке происходит перераспределение энергии между низкими и высокими частотами, и пики становятся более узкими, чем в покое.

Так как период считывания данных (период кардиоинтервалограммы) около 1 с, интервал частот, доступный для анализа, согласно формуле (4) довольно узкий — от 0 до 0,5 Гц. Но в работах [5, 6] показано, что он содержит большой объем информации о состоянии здоровья исследуемого объекта.

Выделяются три частотных диапазона и соответствующие им типы колебаний (волн).

1. Высокие частоты (High Frequency — HF) от 0,1 Гц до 0,5 Гц с длительностью периода от 2 до 10 с, которые являются отражением согласования дыхания и сердечной деятельности и поэтому называются «дыхательными волнами (ДВ)». Мощность дыхательных волн P_{HF} в процентах от суммарной мощности спектра в норме составляет 15–20%. Снижение этой доли до значений 8–10% указывает на смещение вегетативного баланса в сторону преобладания симпатического отдела. Если же величина P_{HF} падает ниже 3%, то можно говорить о резком преобладании симпатической активности.

2. Низкие частоты (Low Frequency — LF) от 0,02 до 0,1 Гц с длительностью периода от 10 до 40 с. Они называются также медленными волнами 1-го порядка (MB-1) или вазомоторными волнами.

Мощность волн LF с периодами длительностью 10–30 с характеризует активность вазомоторного центра регуляции сосудистого тонуса. Время, необходимое вазомоторному центру для приема, обработки и передачи информации, обычно составляет 10–12 с. Его увеличение до 13–14 с указывает на снижение активности вазомоторного центра. В положении «лежа» доля волн LF в норме составляет от 15 % до 40 %. При переходе в положение «стоя» она увеличивается в 1,5–2 раза. У лиц пожилого возраста этот эффект практически отсутствует. У них увеличивается мощность волн VLF.

3. Очень низкие частоты (Very Low Frequency – VLF) менее 0,02 Гц с длительностью периода более 50 с. Они называются также медленными волнами 2-го порядка (МВ-2). Они отражают активность гуморальной системы, характеризуют влияние высших вегетативных центров на сердечно-сосудистый подкорковый центр и поэтому могут использоваться как маркер степени связи автономных (сегментарных) уровней регуляции кровообращения с надсегментарными, в том числе с гипофизарно-гипоталамическим и корковым уровнем. Мощность волн VLF в норме в условиях покоя составляет 15–35 % общей мощности спектра.

По данным спектрального анализа вычисляются два индекса:

1. Индекс централизации (ИЦ или IC)

$$ИЦ = \frac{P_{LF} + P_{VLF}}{P_{HF}}. \quad (6)$$

Он характеризует степень централизации управления ритмом сердца и показывает насколько более мощной является активность центрального контура по отношению к автономному.

2. Индекс активации подкорковых нервных центров (ИАПЦ или IARC)

$$ИАПЦ = \frac{P_{VLF}}{P_{LF}}. \quad (7)$$

Он указывает на активность внутрисистемного уровня по отношению к более высоким уровням регуляции ритма сердца.

Значения ИАПЦ выражаются в баллах от 0 до 10:

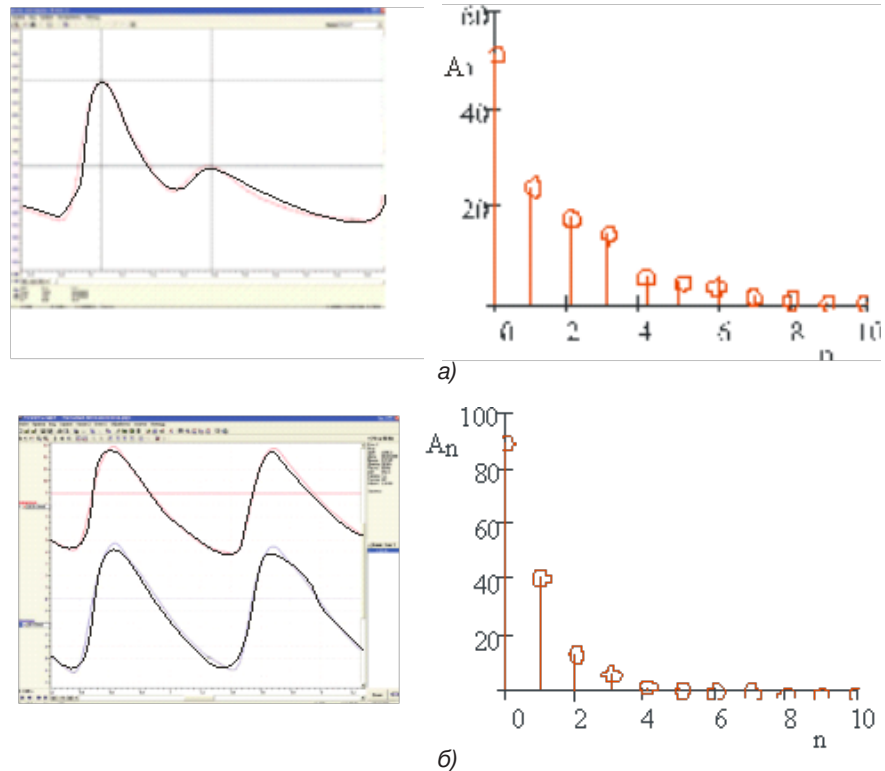


Рис. 6. Спектры сфигмограмм здорового (а) и больного (б) человека

1. Состояние оптимального напряжения регуляторных систем, необходимое для поддержания активного равновесия организма со средой (норма, ИАПЦ = 0–2).

2. Состояние умеренного напряжения регуляторных систем, когда для адаптации к условиям окружающей среды организму требуются дополнительные функциональные резервы. Такие состояния возникают в процессе адаптации к трудовой деятельности, при эмоциональном стрессе или при воздействии неблагоприятных экологических факторов (ИАПЦ = 3–4).

3. Состояние выраженного напряжения регуляторных систем, которое связано с активной мобилизацией защитных механизмов, в том числе повышением активности симпатико-адреналовой системы и системы гипофиз-надпочечники (ИАПЦ = 4–6).

4. Состояние перенапряжения регуляторных систем, для которого характерна недостаточность защитно-приспособительных механизмов, их неспособность обеспечить адекватную реакцию организма на воздействие факторов окружающей среды. Здесь избыточная активация регуляторных систем уже не подкрепляется соответствующими функциональными резервами (ИАПЦ = 6–8).

5. Состояние истощения (астенизации) регуляторных систем, при котором активность управляющих механизмов снижается (недостаточность механизмов регуляции) и появляются характерные признаки патологии. Здесь специфические

изменения отчетливо преобладают над неспецифическими ($ИАПЦ = 8-10$).

Полезную информацию дает спектральный анализ одиночного импульса сфигмограммы. В работах [9–11] показано, что соотношение энергий, содержащихся в низких и высоких частотах спектра сфигмограммы, зависит от возраста и состояния здоровья человека. В работе [10] предложены некоторые числовые коэффициенты, характеризующие это соотношение.

В работе [11] приведены результаты спектрального анализа одиночных импульсов сфигмограммы здорового человека (рис. 6а) и человека, больного артериальной гипертонией (рис. 6б). Спектр сфигмограммы здорового человека более широкий, так как частота сердечных сокращений у него может меняться в больших пределах, чем у больного. В нем присутствует больше высокочастотных составляющих. Предложены численные коэффициенты, характеризующие соотношение высоких и низких частот, которые можно использовать при анализе состояния здоровья человека.

Авторами предложено анализировать спектр сигнала с оптоэлектронного датчика светодиод-фотодиод в течение промежутка времени, охватывающего не один, а много импульсов сфигмограммы. Он содержит информацию и о кардиоинтервалах, и о форме импульсов.

Эксперимент и обработка результатов

Для получения сфигмограммы использовался оптико-электронный датчик, подобный тому, который показан на рис. 4.

Сфигмограмма 1

На рис. 7 показана сфигмограмма девушки 18 лет.

На рис. 8 показана кардиоинтервалограмма, построенная по данным этой сфигмограммы.

Длительность кардиоинтервалограммы — $t_{max} = 58$ с, число точек — $N = 66$, средний период считывания данных — $\Delta t = 0,88$ с, среднее квадратичное отклонение — $S = 0,08$ с.

На рис. 9 показан спектр этой кардиоинтервалограммы. Он перекрывает частотный диапазон от 0 до $f_{max} = 1/(2\Delta t) = 0,57$ Гц. Разрешающая способность по частоте — $\Delta f = 1/t_{max} = 0,017$ Гц.

При анализе состояния сердечно-сосудистой системы по виду спектра в низкочастотном участке (от 0,01 до 0,5 Гц) использовалась методика, изложенная в работах [5] и [6].

Вычисления этих величин по данным спектра 1 дают следующие результаты:

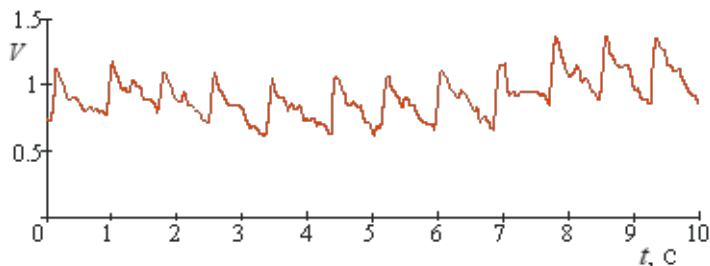


Рис. 7. Сфигмограмма 1

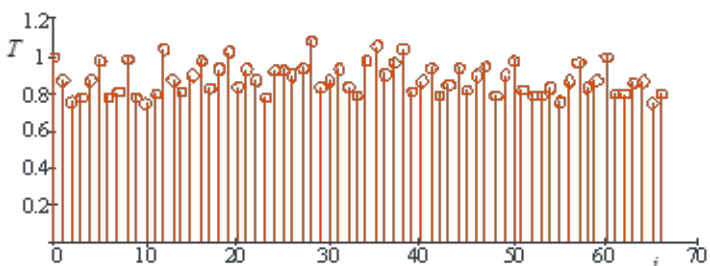


Рис. 8. Кардиоинтервалограмма 1

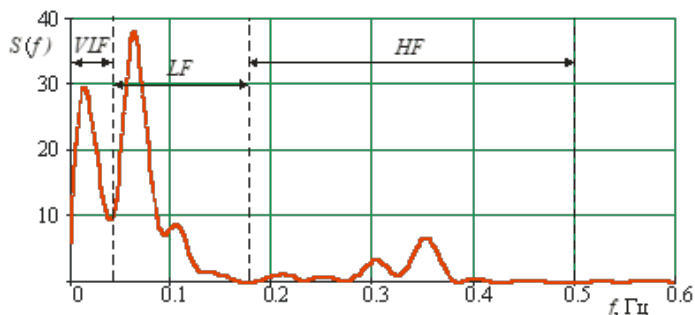


Рис. 9. Спектр 1 (НЧ)

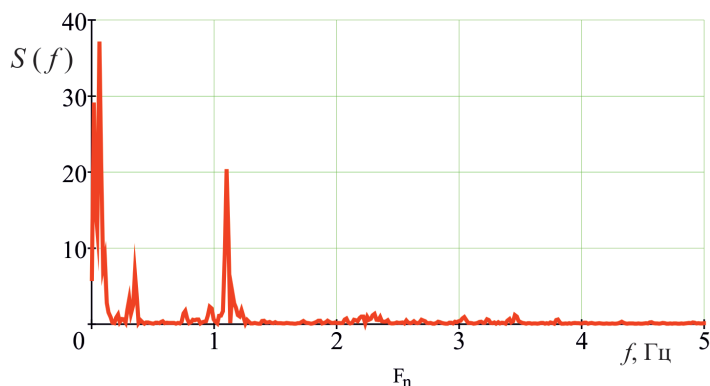


Рис. 10. Спектр 1 (полный)

$$P_{\Sigma} = \int_0^{0,5} S(f) df = 2,56 \text{ — суммарная мощность (в относительных единицах)}$$

$$P_{VLF} = \int_0^{0,04} S(f) df = 0,80$$

$$\frac{P_{VLF}}{P_{\Sigma}} = 31\% \text{ — мощность волн VLF}$$

$$P_{LF} = \int_{0,04}^{0,18} S(f)df = 1,39$$

$$\frac{P_{LF}}{P_{\Sigma}} = 54\% \text{ — мощность волн } LF$$

$$P_{HF} = \int_{0,18}^{0,5} S(f)df = 0,36$$

$$\frac{P_{HF}}{P_{\Sigma}} = 15\% \text{ — мощность волн } HF$$

Индекс централизации — ИЦ = 6,04.

Индекс активации подкорковых нервных центров ИАПЦ = 0,58.

Значения параметров находятся в пределах нормы для здорового человека [5, 6].

На рис. 10 показан спектр, полученный из полной сфигмограммы 1. Длительность сфигмограммы такая же — 58 с, но число точек больше — 58800, период считывания данных — 0,001 с. Поэтому спектр перекрывает намного больший частотный диапазон — от 0 до 500 Гц. Частотный интервал между соседними точками (разрешающая способность) прежний — 0,017 Гц.

На рисунке показан наиболее существенный участок спектра — от 0 до 5 Гц. Низкочастотная часть (от 0 до 0,5 Гц) такая же, как на рис. 9. Далее следуют пики на частоте 1,1 Гц — основная частота сердечных сокращений (66 ударов/мин.), 2,2 Гц — вторая гармоника, 3,3 Гц — третья гармоника. Последующие гармоники более слабые и на графике почти не видны. Пики довольно широкие. Это говорит о том, что сердце легко изменяет частоту сокращений в ответ на внешние воздействия, то есть о хорошем состоянии здоровья исследуемого объекта. Амплитуда второй гармоники составляет около 6 % от амплитуды первой гармоники, амплитуда третьей гармоники — около 2 %.

Сфигмограмма 2

На рис. 11 показана сфигмограмма мужчины 76 лет. Хорошо видны ее отличия от сфигмограммы 1 — зубчатые вершины импульсов и слабые вторичные максимумы.

На рис. 12 показана соответствующая ей кардиоинтервалограмма. Длительность ее примерно такая же, как и кардиоинтервалограммы 1 — $t_{max} = 51$ с, число точек — $N = 66$, средний период считывания данных — $\Delta t = 0,78$ с, среднее квадратичное отклонение $S = 0,04$ с — намного меньше, чем в кардиоинтервалограмме 1. Это говорит о том, что вариабельность частоты сердечных сокращений здесь меньше. Сердце не так хорошо

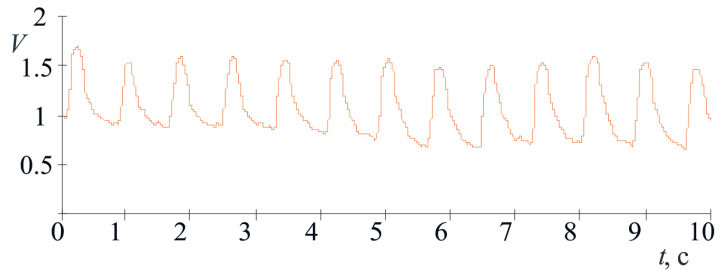


Рис. 11. Сфигмограмма 2

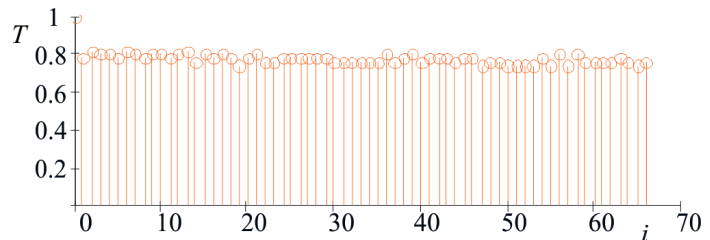


Рис. 12. Кардиоинтервалограмма 2

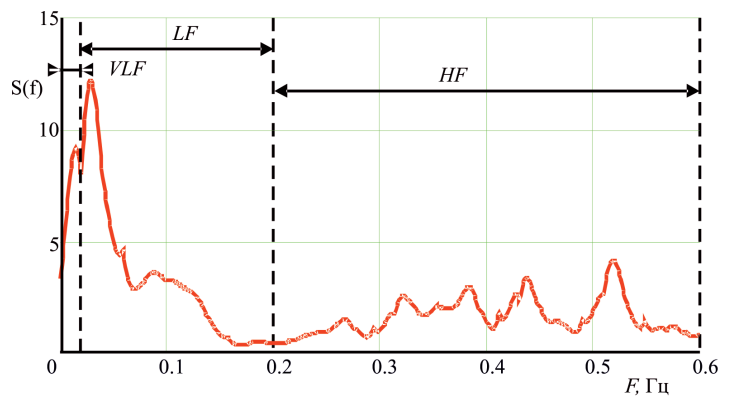


Рис.13. Спектр 2 (НЧ)

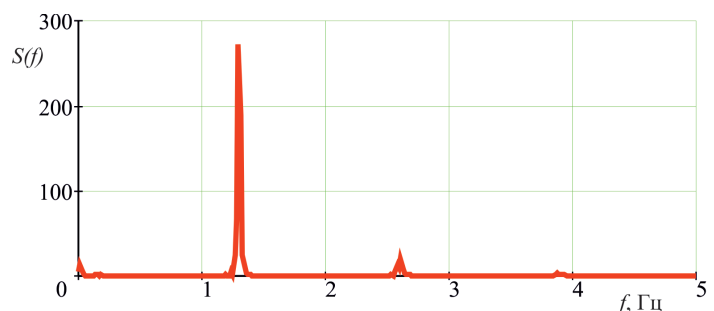


Рис. 14. Спектр 2 (полный)

реагирует на внешние воздействия, как сердце молодого человека.

На рис. 13 приведен график НЧ спектра. Видно, что волны LF занимают примерно такой же энергетический интервал, как и в спектре 1, а соотношение между энергиями волн VLF и HF изменилось в пользу волн HF.

Вычисления по данным спектра 2 дают следующие результаты:

$$P_{\Sigma} = \int_0^{0,6} S(f)df = 1,38 \text{ — суммарная мощность (в относительных единицах)}$$

$$P_{VLF} = \int_0^{0,02} S(f)df = 0,146$$

$$\frac{P_{VLF}}{P_{\Sigma}} = 11\% \text{ — мощность волн VLF}$$

$$P_{LF} = \int_{0,02}^{0,6} S(f)df = 0,597$$

$$\frac{P_{LF}}{P_{\Sigma}} = 43\% \text{ — мощность волн LF}$$

$$P_{HF} = \int_{0,2}^{0,6} S(f)df = 0,631$$

$$\frac{P_{HF}}{P_{\Sigma}} = 46\% \text{ — мощность волн HF}$$

Индекс централизации — ИЦ = 1,18.

Индекс активации подкорковых нервных центров ИАПЦ = 0,24.

Значения параметров сильно отличаются от соответствующих значений у объекта 1. Это хорошо видно в таблице 1, где сравниваются эти два случая. Во втором случае общая мощность, сосредоточенная в области VLF, меньше. Мощность волн LF примерно такая же, как в первом случае, а распределение мощностей VLF и HF противоположное. Значения индексов ИЦ и ИАПЦ значительно меньше.

Изменился и вид полного спектра (рис. 14). Значительно выросли амплитуды основной и высших гармоник. Ширина пиков уменьшилась, что было видно уже из кардиоинтервалограммы. Соотношения между амплитудами гармоник следующие. Амплитуда второй гармоники составляет 7% от амплитуды первой, амплитуда третьей гар-

моники — 1%. Это незначительно отличается от первого случая.

В таблице 2 представлены показатели, характеризующие распределение энергии в полном спектре между низкочастотным участком и гармониками — основной и высшими.

В обоих спектрах существенная часть энергии сосредоточена в основной гармонике (на частоте около 1 Гц). Но в спектре 1 значительная часть энергии находится в НЧ спектре, в то время как в спектре 2 эта часть мала, а почти вся энергия сосредоточена в основной гармонике. На долю НЧ части спектра и высших гармоник приходится малая часть энергии. Причина этого та, что вариабельность частоты сердечных сокращений у объекта 2 значительно меньше, чем у объекта 1. Отклик сердца на внешние воздействия у объекта 1 более гибкий, чем у объекта 2.

Заключение

1. Сфигмография — метод анализа деятельности сердца и сердечно-сосудистой системы, который наряду с электрокардиографией (ЭКГ), кардиоинтервалографией (КИГ), анализом вариаций сердечного ритма (ВСР) позволяет количественно оценить состояние здоровья исследуемого объекта.

2. Достоинство сфигмографии — простота устройства для получения информации. Это может быть система светодиод-фотодиод, между которыми располагается палец руки.

3. Спектральный анализ сфигмограммы в диапазоне частот от 0 до 5 Гц (полного спектра) позволяет провести диагностику состояния здоровья исследуемого объекта и получить дополнительную информацию к информации о спектре НЧ.

4. Проведен анализ двух сфигмограмм. Исследованы низкочастотная часть спектра (от 0,01 Гц до 0,5 Гц) и полный спектр сигнала (от 0 до 5 Гц).

5. Предложены численные параметры полного спектра, характеризующие состояние исследуемого объекта.

Таблица 1

Характеристики спектров НЧ

Объект	P_{VLF}/P_{Σ} , %	P_{LF}/P_{Σ} , %	P_{HF}/P_{Σ} , %	ИЦ	ИАПЦ
1	31	54	15	6,04	0,58
2	11	43	46	1,18	0,24

Таблица 2

Характеристики полных спектров

Объект	$P_{НЧ}/P_{\Sigma}$, %	P_1/P_{Σ} , %	P_2/P_{Σ} , %	P_3/P_{Σ} , %	P_2/P_1 , %	P_3/P_1 , %
1	59	26	6	3	23	13
2	4	84	9	2	11	2

Литература

1. Орлов ВН. Руководство по электрокардиографии. Москва: Медицина; 1983. 528 с.
2. Сыркин АЛ. ЭКГ для врача общей практики. Москва: Медицина; 2006. 176 с.
3. Эберт Г. Простой анализ ЭКГ: интерпретация, дифференциальный диагноз. Москва: Логосфера; 2010. 279 с.
4. Денисов ИН, редактор. Чегаева ТВ. Алгоритмы ЭКГ-диагностики в общеврачебной практике. Москва: Медицина; 2011. 526 с.
5. Баевский РМ. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. Москва: Наука; 1984. 219 с.
6. Яблучанский Н, Мартыненко АВ. Вариабельность сердечного ритма. В помощь практическому врачу. Харьков: Изд-во ХНУ; 2010. 131 с.
7. Парфенов АС. Экспресс-диагностика сердечно-сосудистых заболеваний. Мир измерений. 2008;6:74-82.
8. Харкевич АА. Спектры и анализ. Москва: Физматгиз; 1962. 236 с.
9. Hayward CS, Kraidly M, Webb CM, et al. Assessment of endothelial function using peripheral waveform analysis: a clinical application. *J Amer Coll Cardiol.* 2002;40:521-8.
10. Кырмыченнов ДА. Анализ спектральных характеристик сфигмограммы лучевой артерии при экстрасистолии. Молодой ученый. Физика. 2016;2(106):66-9.
11. Кокодий НГ, Тиманюк ВА. Спектральный анализ одиночного импульса сфигмограммы, полученной с помощью пары светодиод-фотодиод. В: Коробов АМ, редактор. Матеріали XLVIII Міжнар. наук.-практ. конф. Застосування лазерів у медицині та біології; 2018 Трав 24-25; Харків. Харків: ФОП Петрова В.В.; 2018, с. 143-5.
2. Syrkin AL. EKG dlya vracha obshchej praktiki [ECG for a general practitioner]. Moscow: Medicina; 2006. 176 p. (in Russian)
3. Ebert G. Prostoj analiz EKG: interpretaciya, differentsial'nyj diaгноз [A simple ECG analysis: interpretation, differential diagnosis]. Moscow: Logosfera Publ.; 2010. 279 p. (in Russian)
4. Denisov IN, editor. Chegaeva TV. Algoritmy EKG-diaagnostiki v obshchevrachebnoj praktike [ECG diagnostic algorithms in general practice]. Moscow: Medicina Publ.; 2011. 526 p. (in Russian)
5. Baevskij RM. Matematicheskij analiz izmenenij serdech-nogo ritma pri stresse [Mathematical analysis of changes in heart rate during stress]. Moscow: Nauka Publ.; 1984. 219 p. (in Russian)
6. Yabluchanskij N, Martynenko AV. Variabel'nost' serdech-nogo ritma. V pomoshch' prakticheskomu vrachu [Heart rate variability. To help a practitioner]. Kharkov: Izd-vo HNU Publ.; 2010. 131 p. (in Russian)
7. Parfenov AS. [Express diagnostics of cardiovascular diseases]. *Mir izmerenij* [The world of measurements]. 2008;6:74-82. (in Russian)
8. Harkevich AA. Spektry i analiz [Spectra and analysis]. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1962. 236 p. (in Russian)
9. Hayward CS, Kraidly M, Webb CM, et al. Assessment of endothelial function using peripheral waveform analysis: a clinical application. *J Amer Coll Cardiol.* 2002;40:521-8.
10. Kyrmychenov DA. [Analysis of the spectral characteristics of the sphygmogram of the radial artery with extrasystole]. *Molodoj uchenyj. Fizika* [Young scientist. Physics]. 2016;2(106):66-9. (in Russian)
11. Kokodii NG, Timanyuk VA. [Spectral analysis of a single pulse of a sphygmogram obtained using a pair of LED-photodiode]. In: Korobov AM, editor. *Materiali XLVIII Mizhnar. nauk.-prakt. konf. Zastosuvannya lazeriv u medicini ta biologii* [Material XLVIII International science.-practical. conf. The presence of lasers in medicine and biology]; 2018 May 24-25; Harkiv. Harkiv: FOP Petrov V.V. Publ; 2018, p. 143-5. (in Russian)

References

1. Orlov VN. Rukovodstvo po elektrokardiografii [Guide to electrocardiography]. Moscow: Medicina Publ; 1983. 528 p. (in Russian)