

УДК 621.383.52

О.А. ВОЛОШИНА, В.П. ОЛЕЙНИК, С.Н. КУЛИШ, АЛЬ ОТТИ САМИ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОД ЭКГ ДИАГНОСТИКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА И ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

*Предложен метод электрокардиографической (ЭКГ) диагностики функционального состояния человека с применением фрактального анализа и дискретного вейвлет-преобразования. Данный метод позволяет получить качественно новые диагностические показатели, такие как, конфигурация фазовых портретов, показатели фрактальности, геометрическая конфигурация диаграмм  $S_d=f(S_a)$ , при помощи которых можно проводить анализ как грубой динамической, так и информационной структуры ЭКГ сигнала для диагностики общего функционального состояния человека и выявления патологий ССС на стадии их возникновения.*

**Ключевые слова:** *фрактальная размерность, показатель Херста, энтропия, фазовая плоскость.*

**Введение**

По данным статистики Всемирной организации здоровья (ВОЗ) каждый десятый диагноз состояния сердечно-сосудистой системы (ССС) является неверным, что обусловлено многими факторами, в том числе применением спектральных методов, основанных на периодичности и стационарности кардиосигнала. Особенно недостатки общепринятых спектральных методов проявляются в критических состояниях, когда интерес представляют не столько усредненные спектральные оценки, сколько характерные изменения в сердечном ритме, поскольку его реальная динамика далека от этих математических абстракций.

Кардиосигнал является нестационарным, имеющим как периодические, так и хаотические составляющие, поэтому актуальной задачей является анализ его динамики по методу вложения Такенса и рассмотрение организма человека как сложной нелинейной динамической системы.

Анализ работ последних лет по различным аспектам изучения сердечного ритма показывает, что помимо классических методов анализа во временной и частотной области существует устойчивая тенденция и все больший интерес к изучению сердечного ритма с позиций нелинейного анализа [1]. Сердечный ритм – результат функционирования сложной саморегулирующейся нейрофизиологической системы управления, деятельность которой является причиной выраженной неоднородности и нестационарности его флуктуаций. В этой ситуации сравнение и классификация кардиограмм становится задачей, в решении которой традиционные методы (описательная статистика, спектральные и корреляционные методы) часто терпят неудачу [2]. При

традиционном рассмотрении шумоподобная «внутренняя» структура сердечного ритма обычно игнорируется из рассмотрения, поскольку считается, что этот шум случаен и в нем отсутствует значащая информация. Детальное же рассмотрение ЭКГ данных при помощи методов нелинейной динамики позволило выявить скрытую сложную масштабную структуру с фрактальными свойствами, чувствительно реагирующую на изменения адаптационных возможностей организма.

**Постановка задачи исследования**

Для изучения динамики и выявления локальных особенностей временных рядов, необходимых для поиска предвестников возникновения критических состояний или патологии, одновременно в частотной и временной области могут использоваться вейвлет-преобразование и методы теории фракталов.

Огромное количество естественных систем, поведение которых внешне воспринимается как хаотическое, объединяет общее свойство самоподобия (инвариантность относительно изменения масштаба), или фрактальность. Метод фракталов позволяет аналитически и графически описать ССС как сложную систему, состоящую из более простых систем, детально изучить динамику процессов и влияние на нее внешних воздействий, в том числе физических нагрузок.

Вейвлет-преобразование позволяет получить информацию, как о частотном составе сигнала, так и о его временной локализации (в отличие от преобразования Фурье, которое дает информацию о частотном составе без локализации во времени), выявить индивидуальные особенности кардиосигнала.

Таким образом, целью данной работы является разработка метода ЭКГ диагностики функционального состояния (ФС) ССС человека, основанного на фрактальном анализе и дискретном вейвлет-преобразовании.

## Метод ЭКГ диагностики с применением фрактального анализа и вейвлет-преобразования

### 1. Этапы метода ЭКГ диагностики

Метод диагностики состоит из следующих этапов:

- а) построение фазового портрета ЭКГ;
- б) расчет показателей фрактальности;
  - 1) показатель Херста  $H$ ;
  - 2) фрактальная размерность  $D$ ;
  - 3) размерность фазового пространства  $D_p$ ;
  - 4) корреляционная энтропия  $E_c$ .
- в) дискретное вейвлет-преобразование;
  - 1) расчет статистических характеристик;
  - 2) построение диаграмм коэффициентов детализации  $C_d$  и аппроксимации  $C_a$  в параметрическом виде  $C_d=f(C_a)$ .

### 2. Анализ ЭКГ в фазовом пространстве координат

Существующие системы компьютерной обработки ЭКГ во временной области не обеспечивают требуемую достоверность принимаемых решений главным образом из-за ошибок, возникающих на стадии автоматического распознавания информативных фрагментов ЭКГ, поскольку в реальных ЭКГ нет четких границ между отдельными фрагментами, подлежащими распознаванию. К тому же, ряд последних исследований показывает, что даже у здоровых людей в состоянии покоя сердечный ритм подвержен значительным колебаниям, которые обусловлены не столько реакцией организма на внешние возмущения, сколько фрактальной природой самой ЭКГ. Другими словами, частота сердечных сокращений вовсе не стремится к гомеостатичной (стабильной) величине, как это предполагалось ранее, а постоянно претерпевает значительные флуктуации даже при отсутствии внешних возмущений, и эти флуктуации не обязательно являются предвестниками каких-либо патологий организма.

Именно поэтому первым этапом метода является альтернативный подход к анализу ЭКГ, метод отображения ЭКГ в фазовом пространстве, позволяющий повысить чувствительность к тонким изменениям структуры сигнала, которые обычно недооцениваются при его традиционном представлении во временной области. Основная идея этого метода

состоит в том, что на основе обработки временного электрокардиосигнала  $X = X(t)$  оценивается его производная и в координатах  $X - dX/dt$  отображается графическая зависимость между амплитудой ЭКГ и ее скоростью изменения во времени (фазовая траектория), что позволяет сравнить множество кардиосигналов. Эффективность данного метода обусловлена тем, дифференцирование позволяет увеличить разрешение характеристики, поэтому дифференцированная ЭКГ неизбежно содержит дополнительную ценную информацию о динамическом состоянии ССС испытуемого.

Рассмотрим кардиосигналы человека-оператора, снятые с четвертого грудного отведения  $V_4$ , в состоянии покоя (ФС1) и после физической нагрузки (ФС2), и записанные на кардиографе с частотой дискретизации 500 отсчетов в секунду (рис. 1).

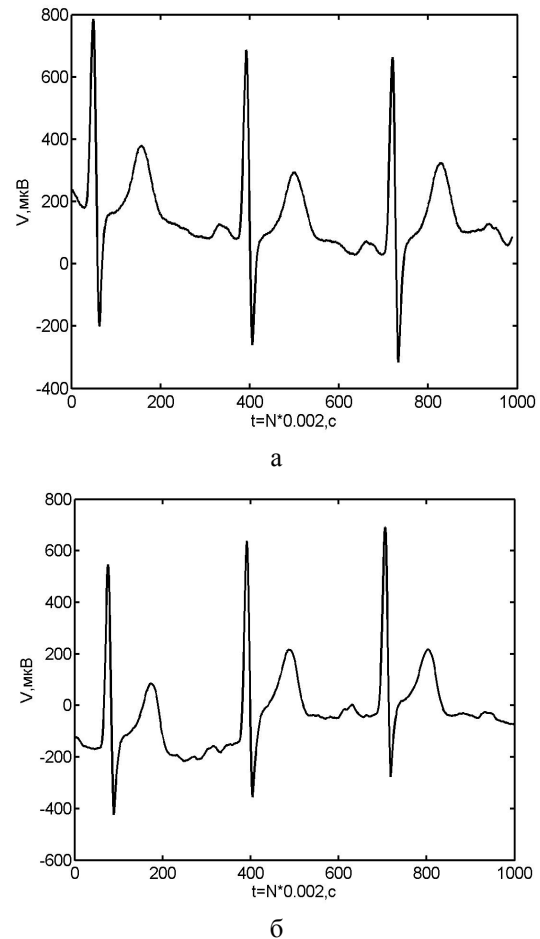
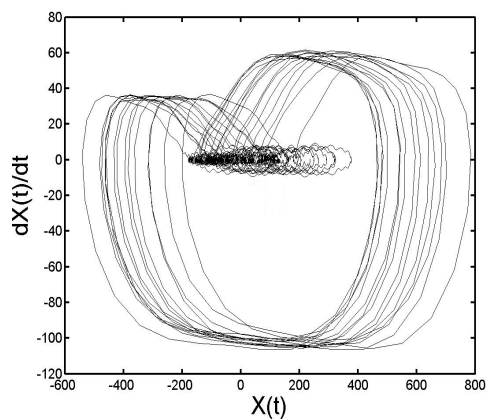
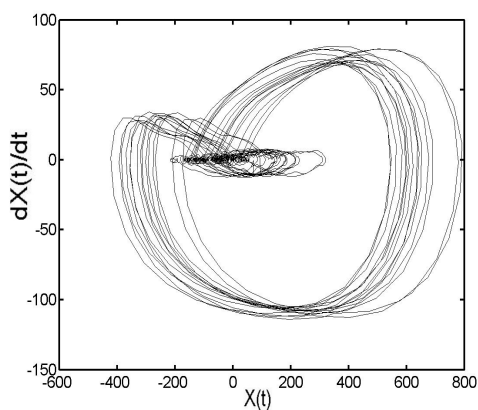


Рис. 1. Кардиосигналы  $X(t)$  (отведение  $V_4$ ) человека-оператора: а – ФС1, б – ФС2

При рассмотрении фазового портрета  $X - dX/dt$  кардиосигнала в состоянии покоя (рис. 2, а) наблюдается четкая цикличность и хорошая воспроизводимость процессов, после нагрузки (рис. 2, б) – видна хаотичность и асимметричность поведения фазовой траектории в области Р пика, которая соответствует процессу возбуждения предсердий.



а



б

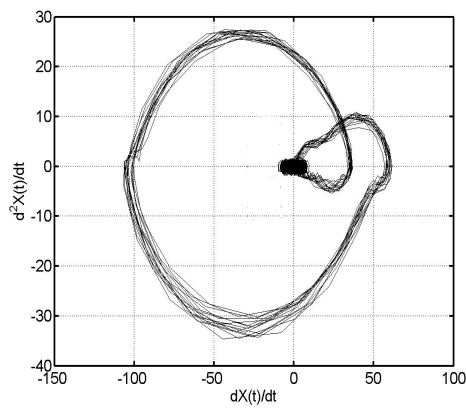
Рис. 2. Фазовые портреты  $dX/dt = f(X(t))$ :  
а – ФС1, б – ФС2

Диагностическую значимость имеют такие характеристические признаки фазовых портретов, как форма, площадь, плотность фазовых траекторий.

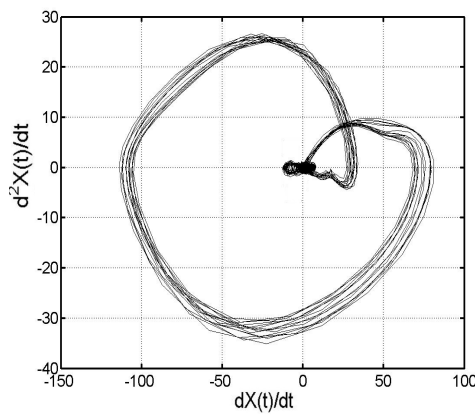
Соотношение площадей фазовых портретов первого порядка кардиосигналов в ФС1 и ФС2 составляет 1,19. Это указывает на то, что система не восстановилась, динамика процессов ухудшилась, а значит адаптационная способность организма недостаточная при выполнении физической нагрузки.

Для подтверждения этого была построена зависимость 2-й производной от 1-й производной,  $dX/dt - d^2X/dt^2$  или фазовый портрет 2-го порядка (рис. 3, а, б), который содержит дополнительную информацию о энергетических характеристиках кардиосигнала.

Фазовый портрет 2-го порядка подобен фазовому портрету 1-го порядка и имеет те же характеристические признаки, позволяющие проводить диагностику адаптационных возможностей и нарушений деятельности ССС (соотношение площадей фазовых портретов 2-го порядка для ФС1 и ФС2 составляет 1,06). Построение фазовых портретов повышает разрешение кардиосигнала и предоставляет дополнительные характеристические признаки состояния ССС.



а



б

Рис. 3. Фазовые портреты 2-го порядка  $d^2X/dt^2 = f(dX/dt)$ : а – ФС1, б – ФС2

### 3. Расчет показателей фрактальности

Основной количественной характеристикой фракталов является размерность  $D$  [3]:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} (\ln N(\delta) / \ln(1/\delta)), \quad (1)$$

где  $N(\delta)$  – минимальное количество шаров радиуса  $\delta$ , покрывающих это множество.

Основанием для введения этого определения является асимптотика для  $N(\delta)$ , которая в случае фрактальных множеств определяется выражением:

$$(1/\delta)^D \approx N(\delta). \quad (2)$$

Для большинства естественных временных рядов, аналитическое нахождение фрактальной размерности невозможно, поэтому  $D$  определяют через величины, связанные с ней простым соотношением (например, через показатель Херста  $H$ ).

Для временных рядов различных естественных процессов наблюдаемый нормированный размах  $R/S$  описывается эмпирическим соотношением:

$$R/S = (\tau/2)^H, \quad (3)$$

где  $R(\tau)$  – размах временного ряда за период  $\tau$ ,  $S$  – стандартное отклонение за период  $\tau$ ,  $\xi(t)$  – значение

ряда в момент времени  $\tau$ ,  $\bar{\xi}_\tau$  – среднее значение ряда за период  $\tau$ ,  $H$  – показатель Херста.

Было показано [4], что временные ряды, демонстрирующие подобное поведение являются естественными фракталами, причем их размерность может быть определена по формуле:

$$D = 2 - H. \quad (4)$$

Размерность фазового пространства является минимальной размерностью пространства, в которое можно вложить ряд значений в виде динамической системы (странного аттрактора).

Были вычислены показатели фрактальности и их соотношения для двух состояний человека-оператора (табл. 1).

Таблица 1

Показатели фрактальности

Состояние пациента	Показатель Херста (H)	Фрактальная размерность (D)	Размерность фазового пространства ( $D_p$ )	Корреляционная энтропия ( $E_c$ )
ФС1	0,7422	1,2578	12	0,296
ФС2	0,9504	1,0496	7	0,563
ФС1/ФС2	0,7809	1,1983	1,72	0,526

Значение фрактальной размерности  $D$  и размерности фазового пространства  $D_p$  для ФС1 больше, чем для ФС2, на основании чего приходим к выводу, что чем меньше разброс показателей кардиосигнала, тем ниже адаптационные возможности организма, а значит выше вероятность возникновения патологии. Т.е. высокая стохастичность сердечного ритма позволяет организму функционировать в широком диапазоне и наоборот.

Значение корреляционной энтропии  $E_c$  показывает, что фазовый портрет кардиосигнала человека-оператора в состоянии покоя более информативен, чем после нагрузки.

Таким образом, стохастические характеристики, вычисленные для различных состояний, существенно различны и представляют диагностическую значимость.

#### 4. Дискретное вейвлет-преобразование

Идея применения вейвлет-преобразования заключается в том, что разложение сигнала производится по базису, образованному сдвигами и разномасштабными копиями функции-прототипа, то есть оно, по сути, является фрактальным.

Кардиосигнал обладает как грубой, так и тонкой структурой. Для ее выявления можно применить дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) по базису Хаара. Элементы вейвлет-преобразования хоро-

шо локализованы, а подвижное частотно-временное окно дает возможность «сканирования» одновременно в частотной (по масштабу) и временной областях. Основанием для выбора базисного вейвлета является критерий минимума информационной энтропии [4, 5].

Преобразовывая кардиосигнал с помощью набора цифровых фильтров с изменяемой импульсной характеристикой, имеем возможность анализировать локальные возмущения сигнала при сохранении хорошего разрешения, как по времени, так и по масштабу (частоте). При этом каждый масштабный уровень вейвлет-разложения соответственно характеризуется индивидуальными подмножествами коэффициентов аппроксимации  $C_a$  и детализации  $C_d$ .

Разложение кардиосигнала по различным масштабным уровням на аппроксимирующие коэффициенты  $C_a$  подобно численному интегрированию с различным шагом, а на детализирующие коэффициенты  $C_d$  – подобно численному дифференцированию с различным шагом. Вейвлет Хаара имеет центральную частоту  $F_g = 0,9961$  Гц. Поскольку  $\Delta t = 1/500$ , то центральная частота вейвлета, используемого для первого уровня разложения, равна  $F_{r1} = 0,9961 * 500 = 498,05$  Гц. Для второго уровня разложения частота вейвлета будет в 2 раза меньше,  $F_{r2} = 249,025$  Гц. Вейвлет-коэффициенты  $C_{d1}$ ,  $C_{d2}$  отражают характеристики кардиосигнала на указанных частотах.

Найдем среднее квадратичное отклонение полученных детализирующих вейвлет-коэффициентов на двух уровнях разложения ( $C_{d1}$ ,  $C_{d2}$ ). Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики вейвлет-коэффициентов

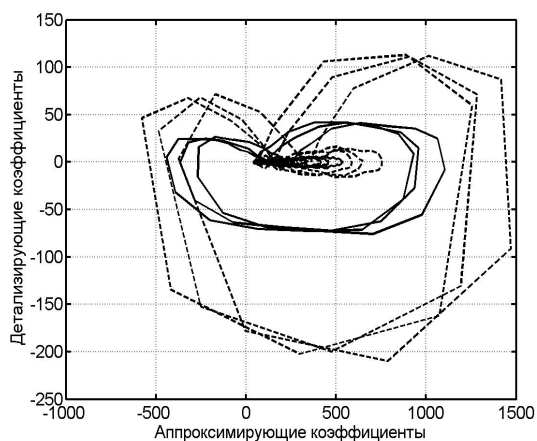
Состояние	$\sigma(C_{d1})$	$\sigma(C_{d2})$
ФС1	13,753	38,443
ФС2	6,808	22,743
ФС1/ФС2	2,02	1,69

Стандартные отклонения для различных состояний отличаются почти в 2 раза, поэтому они представляют диагностическую значимость.

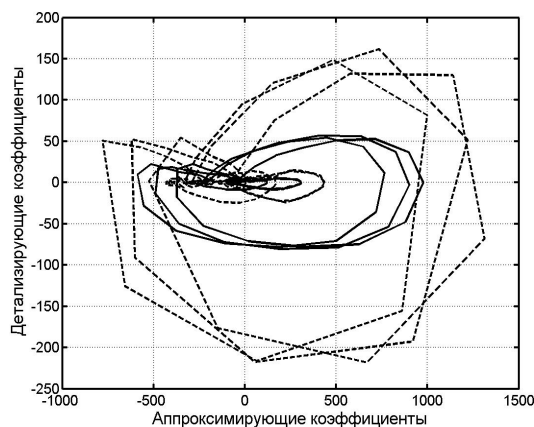
ДВП по базису Хаара, работающее как «математический микроскоп», увеличивает объем информации, находящийся в значениях коэффициентов, и разрешение кардиосигнала, что соответствует критерию минимума информационной энтропии.

Увеличивая уровень разложения, соответственно разрешение, появляется возможность рассмотрения тонких деталей кардиосигнала, уменьшая разрешение – возможность рассмотрения «грубой» картины или крупномасштабных явлений.

Для перехода к количественным показателям и получения обобщенных результатов с фрактальным анализом предложено представление подмножеств детализирующих и аппроксимирующих коэффициентов в параметрическом виде  $Cd = f(Ca)$ . В результате получаем диаграммы  $Cd = f(Ca)$  человека-оператора в ФС1 и ФС2 соответственно (рис. 4, а, б), которые характеризуются площадью  $S$ , кривизной  $C$  и длиной дугообразных участков  $l$ . На каждом масштабном уровне не только просматриваются локальные изменения в кардиосигнале, но и перераспределение между ними при переходе из одного масштабного уровня разложения на другой. Конфигурация этих диаграмм интегративно отображает влияние составляющих кардиосигнала на различных масштабных уровнях. Это позволило выявить особенности перестройки конфигурации диаграмм, как на определенном масштабном уровне, так и при переходе из одного уровня на другой.



а



б

Рис. 4. Диаграммы  $Cd=f(Ca)$  на 2-х уровнях разложения (сплошная линия – 1-й уровень, штриховая – 2-й): а – ФС1, б – ФС2

Диаграммы  $Cd=f(Ca)$  человека-оператора после нагрузки существенно отличаются от диаграмм

$Cd=f(Ca)$  в состоянии покоя по форме, кривизне  $C$  и площади  $S$ . Соотношение площадей диаграмм 1-го уровня разложения для ФС1 и ФС2 человека-оператора составляет 1,2, 2-го уровня – 0,98, что подтверждает результаты фрактального анализа, поскольку диаграммы 1-го уровня разложения соответствуют фазовым портретам 1-го порядка, а диаграммы 2-го уровня – фазовым портретам 2-го порядка.

Фазовые портреты интегрально представляют кардиосигнал (дифференцирование по всей временной шкале), а диаграммы  $Cd=f(Ca)$  – дифференциально (дифференцирование с различным шагом), следовательно ДВП подтверждает и дополняет результаты фрактального анализа. Также диаграммы  $Cd=f(Ca)$  выявляют многомасштабность кардиосигнала, которая является следствием влияния различных факторов на работу ССС, как внешних, так и внутренних, и взаимосвязи между подсистемами ССС, то есть позволяют работать с кардиосигналом по методу Такенса.

Таким образом, по геометрической конфигурации диаграмм  $Cd=f(Ca)$  (площади  $S$ , длине  $l$ , кривизне  $C$ ) можно оценить степень функционирования организма в условиях реализации адаптационной функции ССС, а также проводить анализ тонкой (информационной) структуры ЭКГ для диагностики патологий ССС на стадии их возникновения.

## Заключение

Предложен метод ЭКГ диагностики функционального состояния человека с применением фрактального анализа и дискретного вейвлет-преобразования.

Данный метод позволяет получить качественно новые диагностические показатели, такие как, конфигурация фазовых портретов, показатели фрактальности, геометрическая конфигурация диаграмм  $Cd=f(Ca)$ , при помощи которых можно проводить анализ как грубой динамической, так и информационной структуры ЭКГ для диагностики общего функционального состояния человека и выявления патологий ССС на стадии их возникновения. Главным преимуществом метода является то, что он позволяет получить информацию о динамике ЭКГ, выделяет детали с наилучшим локальным разрешением по частоте, в отличие от методов, основанных на преобразовании Фурье, предоставляющих лишь усредненные результаты, которые не отображают реальное физиологическое состояние ССС человека.

Предложенный метод может быть применен не только в медицинском диагностическом оборудовании, но и для исследования сложных динамических систем.

## Литература

1. Абуладзе Г.В. Ультразвуковая и функциональная диагностика / Г.В. Абуладзе // Медицинская техника. – 2003. – № 2. – С. 128-137.
2. Халфен Э.Ш. Клиническое значение исследования скоростных показателей зубца Т ЭКГ / Э.Ш. Халфен // Кардиология. – 1986. – № 6. – С. 60-62.
3. Федер Дж. Фракталы / Дж. Федер. – М.: Горячая линия. – Телеком, 1999. – 328 с.
4. Волошина О.А. Взаимосвязь физического и информационного состояний полупроводниковых сенсоров CdZnTe / О.А. Волошина // Интегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні, ІКТМ'2008: тез. докл. Международной НТК, 21 ноября 2008 г. – Х., 2008. – С. 254.
5. Волошина О.А. Нелинейно-динамический анализ биологических ритмов / О.А. Волошина // Интегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні, ІКТМ'2009: тез. докл. Международной НТК, 27 ноября 2009 г. – Х., 2009. – С. 385.

Поступила в редакцию 15.10.2010

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., зав. отделом «Распространение радиоволн в природных средах» Ф.В. Кивва, Институт радиопрофики и электроники НАН Украины им. А.Я. Усикова, Харьков.

### МЕТОД ЕКГ ДІАГНОСТИКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ НА ОСНОВІ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТА ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

*О.О. Волошина, В.П. Олійник, С.М. Куліш, Аль Оті Самі*

Запропонований метод ЕКГ діагностики функціонального стану людини із застосуванням фрактального аналізу та дискретного вейвлет-перетворення. Даний метод дозволяє отримати якісно нові діагностичні показники, такі як, конфігурація фазових портретів, показники фрактальності, геометрична конфігурація діаграм  $C_d = f(C_a)$ , за допомогою яких можна проводити аналіз як грубої динамічної, так і інформаційної структури ЕКГ сигналу для діагностики загального функціонального стану людини та виявлення патологій ССС на стадії їх виникнення.

**Ключові слова:** фрактальна розмірність, показник Херсту, ентропія, фазова площина.

### METHOD EKG DIAGNOSTICS OF FUNCTIONAL STATE HUMAN ON THE BASIS OF FRACTAL ANALYSIS AND WAVELET-TRANSFORM

*A.O. Voloshina, V.P. Oliynick, S.N. Kulish, Al Otti Sami*

The method EKG diagnostics of the functional state human with the use of fractal analysis and discrete wavelet-transform is offered. This method allows to get high-quality new diagnostic indexes such as configuration of phase portraits, fractal indexes, geometrical configuration of the diagrams  $C_d = f(C_a)$  through which it is possible to conduct the analysis both rough dynamic and informative structure of EKG signals for diagnostics of the common functional state of human and exposure of the pathologies hearts on the stage of their origin.

**Key words:** fractal dimension, index Herst, entropy, phase plane.

**Волошина Оксана Александровна** – магістрант кафедри «Производство радиоэлектронных систем летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: brusnykina@mail.ru.

**Олейник Владимир Петрович** – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Производство радиоэлектронных систем летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: oliynuk@xai.edu.ua

**Кулиш Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Производство радиоэлектронных систем летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

**Аль Отти Самі** – соискатель кафедры «Производство радиоэлектронных систем летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.