

Н. Т. Абдуллаев<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц., e-mail: a.namik46@mail.ru,

М. М. Гасанкулиева<sup>2</sup>, диссертант,

<sup>1</sup> Азербайджанский технический университет

<sup>2</sup> Азербайджанская государственная нефтяная академия

## Информативные параметры и флуктуационная динамика электрокардиограмм при фликкер-шумовой спектроскопии

*На основе дискретно фиксируемых временных рядов электрокардиографических сигналов проводится анализ спектральной мощности и переходных разностных моментов второго порядка. Такой анализ позволяет получить информативные диагностические параметры, оценивающие функциональное состояние сердечно-сосудистой системы пациента. Одним из факторов, позволяющих оценить флуктуационную динамику электрокардиограмм и выделить вклад нерегулярностей в анализируемые реальные сигналы, может быть вариация используемых частот дискретизации.*

**Ключевые слова:** фликкер-шумовая спектроскопия, электрокардиография, дифференциальная диагностика, информативные параметры, частота дискретизации сигнала

### Введение

Основная масса исследований функционального состояния сердечно-сосудистой системы ведется с применением статистической обработки, временного и спектрального анализа ритмограмм и последующей разработкой различных методик, основанных на этих методах.

При исследованиях открытых живых динамических систем, например организма человека, условия эргодичности и стационарности регистрируемых процессов не выполняются, и использование в целях анализа состояния организма осредненных статистических характеристик медицинских показателей может служить лишь грубой оценочной информацией по этим процессам.

В области исследования сердечно-сосудистой системы выделяют в основном методы анализа, строго математически применимые к стационарным сигналам, однако в медицинской практике преобладают нестационарные сигналы, статистические свойства которых изменяются со временем. Часто они состоят из кратковременных высокочастотных компонентов, сопровождаемых длительными низкочастотными составляющими.

Учитывая такой характер биоэлектрических потенциалов, и в частности электрокардиографических сигналов, наиболее приемлемым для их анализа может быть метод нелинейной динамики с вычислением количественных характеристик хаоса. Таковую возможность представляет метод фликкер-шумовой спектроскопии, учитывающий в сложной динамической системе эффект перемежаемости, когда участки хаотических всплесков и скачков чередуются относительно длительными участками ламинарного характера. Анализ сигналов, имеющих такой динамический характер, основывается, как правило, на

применении метода фликкер-шумовой спектроскопии.

### Постановка проблемы

При анализе оцифрованных сигналов возникает вопрос о характере информации, которая может быть извлечена из исследуемого сигнала  $V(t)$  в случае, если это сложный хаотический сигнал, фиксируемый с частотой дискретизации  $f_d$ . Электрокардиографическому сигналу присущи основные для режима "перемежаемости" черты, когда "ламинарные" фазы с относительно небольшими изменениями динамической переменной  $V(t)$  на временных интервалах с достаточно большой длительностью  $T$  прерываются кратковременными в течение времени  $\tau$  ( $\tau \ll T$ ) всплесками значений  $V(t)$ , характерными для последующей во времени "ламинарной" фазы [1]. Анализ электрокардиограммы (ЭКГ) показывает, что она соответствует описанной динамике, когда "всплески" в виде QRS-комплексов чередуются достаточно малыми скачками в виде  $P$ - и  $T$ -зубцов и протяженными фазами в виде изолинии ("ламинарная" фаза) [2]. Величина и продолжительность таких "скачков", "всплесков" и "ламинарных" участков специфичны для каждой из сердечно-сосудистых систем, обуславливая определенный вклад в соответствующий спектр мощности и определяя совокупность информативных диагностических параметров, характеризующих корреляционные взаимосвязи в таких последовательностях.

Применение метода фликкер-шумовой спектроскопии [3] позволяет придать информационную значимость последовательностям различных нерегулярностей (всплески, скачки, изломы производных различных порядков) динамических перемен-

ных исследуемых систем и, в частности, сердечно-сосудистой системы организма. Принятие нерегулярностей динамических переменных в качестве информационной основы позволяет классифицировать всю содержащуюся в хаотических сигналах информацию. Как правило, с помощью фликкер-шумовой спектроскопии анализируются спектр мощности сигнала  $S(f)$  и переходные разностные моменты второго порядка  $\Phi^{(2)}(\tau)$ . Информация, извлекаемая из анализа зависимостей  $S(f)$  и  $\Phi^{(2)}(\tau)$ , построенных на основе временных рядов  $V(t)$ , имеет смысл времени корреляции или параметров, характеризующих потерю корреляционных связей для рассматриваемых нерегулярностей типа всплесков и скачков. В таком случае исследуемый ЭКГ-сигнал удобно представить в виде суммы двух слагаемых: сингулярного члена  $V_s(t)$ , который формируется лишь всплесками динамической переменной, и регулярного члена  $V_r(t)$ , который формируется после вычитания всплесков из представленного сигнала и определяется скачками динамической переменной и "ламинарными" фазами. Каждая из составляющих исследуемого сигнала характеризуется совокупностью извлекаемых параметров  $T_0, n_0, S_s(0)$  — для сингулярной составляющей и  $H_1, T_1, \sigma_1$  — для регулярной составляющей сигнала [3, 4].

Для сингулярной составляющей сигнала  $V(t)$  параметр  $T_0$  определяет некоторое характерное время, в пределах которого реализуется взаимосвязь измеряемой динамической переменной  $V(t)$ . Безразмерный параметр  $n_0$  эффективно определяет, каким образом эта взаимосвязь теряется по мере уменьшения частот до значений  $1/(2\pi T_0)$ . Параметр  $S_s(0)$  — это вклад в спектр мощности  $S(f)$ , определяемый наиболее высокочастотной составляющей, формируемый "нерегулярностями — всплесками".

Для регулярной составляющей сигнала  $V(t)$  параметр  $T_1$  определяет характерное время, на котором величины динамических переменных  $V(t_i)$  не коррелируют (если их аргументы различаются на величину  $T_1$ ). Для получения достоверных значений дисперсии  $\sigma_1^2$  необходимо ее рассчитывать на временных интервалах, превышающих  $T_1$ . При этом параметр  $H_1$  (показатель Херста) показывает по какому закону теряется взаимосвязь измеряемых в разные моменты времени величин  $V(t_i)$ .

В общем случае при анализе сложного хаотического сигнала, измеряемого при некоторой частоте дискретизации  $f_d$ , определяется совокупность указанных параметров, характеризующая корреляционные взаимосвязи в последовательностях нерегулярностей-скачков и нерегулярностей-всплесков, свойственных данному сигналу, определяемому с частотой дискретизации  $f_d$ . Таким образом, одним из основных факторов, позволяющим реализовать выделение вклада нерегулярностей в анализируемые

реальные сигналы, является вариация используемых частот дискретизации  $f_d$ . Если анализируемый временной ряд получен при достаточно высокой частоте дискретизации  $f_d$ , то анализ зависимостей  $\Phi^{(2)}(\tau)$  и  $S(f)$ , рассчитываемых на основе временных рядов, полученных из исходного временного ряда с уменьшающейся частотой дискретизации, позволяет оценить меру "устойчивости" параметров  $\sigma_1, T_1$  и  $H_1$  (для  $\Phi^{(2)}(\tau)$ ) и меру вариабельности параметров  $S_s(0), T_0$  и  $n_0$  (для  $S(f)$ ).

### Результаты вычислительного эксперимента и их анализ

Высокая специфичность зависимостей  $\Phi^{(2)}(\tau)$  и  $S(f)$ , получаемых при анализе состояния сложных систем, может быть использована для диагностики болезней, так же как совокупность указанных параметров для их классификации. Анализируются ЭКГ-сигналы четырех типов — норма и сердечные "катастрофические" аритмии, непосредственно угрожающие жизни пациента (желудочковая тахикардия, предсердная фибрилляция, предсердная аритмия). Для выявления особенностей анализируемых сигналов необходимо оценить всю совокупность полученных оцифрованных данных  $V(t)$  ЭКГ для указанных состояний сердечно-сосудистой системы. При проведении вычислительного эксперимента использовались экспериментальные данные с общедоступного сайта [www.PhysioNet.org](http://www.PhysioNet.org) [5].

Сигналы снимались со II-стандартного отведения в течение ~60 с с частотой дискретизации  $f_d = 500$  Гц и числом точек  $N = 29\,859$ . Таким образом, был получен временной ряд ЭКГ-сигналов при достаточно высокой частоте дискретизации  $f_d$ , поскольку на его основе можно получить набор новых временных рядов при частотах дискретизации, меньших  $f_d$  в кратное число раз.

Результаты соответствующего анализа для указанных функциональных состояний сердечно-сосудистой системы при частоте дискретизации ЭКГ-сигналов  $f_d = 500$  Гц приведены в табл. 1.

Проведем сравнительный анализ информативных параметров для двух состояний сердечно-сосудистой системы: норма (табл. 2) и желудочковая тахикардия (табл. 3) для частот дискретизации  $f_d = 500$  Гц и  $f_d = 250$  Гц.

Из полученных таблиц следует, что при увеличении частоты дискретизации  $f_d$  возрастает высокочастотный вклад в спектр мощности  $S(f)$  за счет включения в анализируемый сигнал "всплесков", соответствующих увеличенной частоте  $f_d$ . При этом также происходят изменения зависимости  $\Phi^{(2)}(\tau)$  при малых  $\tau$ , которые обусловлены вкладом локальных изменений в величины "ламинарных" участков сигнала. Поэтому при возрастании  $f_d$  изменяются как параметры  $T_0$  и  $n_0$ , характеризующие

Информативные диагностические параметры для различных функциональных состояний сердечно-сосудистой системы

ЭКГ-сигнал	Сингулярная составляющая			Регулярная составляющая		
	$S_s(0)$ , отн. ед.	$T_0$ , отн. ед.	$n_0$	$\sigma_1$ , отн. ед.	$H_1$	$T_1$ , отн. ед.
Норма	437,80	0,0042	0,3414	0,55	1,1133	1,5080
Желудочковая тахикардия	197,358	0,0032	0,4123	0,51	1,0913	0,6840
Предсердная фибрилляция	334,364	0,0036	0,3836	0,435	1,1388	0,0640
Предсердная аритмия	43,7105	0,0059	0,4013	0,208	1,1298	1,1560

Таблица 2

## Норма

$f_d$ , Гц	$N$	Сингулярная составляющая			Регулярная составляющая			$\frac{4S(0)}{N}$
		$S_s(0)$ , отн. ед.	$T_0$ , отн. ед.	$n_0$	$\sigma_1$ , отн. ед.	$H_1$	$T_1$ , отн. ед.	
500	29 859	437,80	0,0042	0,3414	0,55	1,1133	1,5080	0,05
250	14 930	403,72	0,0028	0,4187	0,5044	1,0845	1,38	0,08

Таблица 3

## Желудочковая тахикардия

$f_d$ , Гц	$N$	Сингулярная составляющая			Регулярная составляющая			$\frac{4S(0)}{N}$
		$S_s(0)$ , отн. ед.	$T_0$ , отн. ед.	$n_0$	$\sigma_1$ , отн. ед.	$H_1$	$T_1$ , отн. ед.	
500	29 859	197,358	0,0032	0,4123	0,5180	1,0913	0,6840	0,026
250	14 930	175,80	0,0034	0,3446	0,517	1,5200	0,340	0,10

высокочастотную область зависимости  $S(f)$ , так и параметры  $H_1$  и  $T_1$ , характеризующие зависимость  $\Phi^{(2)}(\tau)$  при малых  $\tau$ . Величина параметра  $\sigma_1$ , а также характер спектральной зависимости  $S(f)$  изменяются в значительно меньшей степени. Небольшие вариации параметра среднеквадратичного отклонения  $\sigma_1$  указывают на меньшую зависимость функции  $\Phi^{(2)}(\tau)$  от  $f_d$ . В то же время анализ сигналов при фликкер-шумовой спектроскопии выявляет динамику изменений параметров  $H_1$  и  $T_1$  при малых  $\tau$ , а также параметров  $T_0$  и  $n_0$ , характеризующих зависимость  $S(f)$  в высокочастотной области. Поскольку зависимость  $S(f)$  определяется числом  $M$  слагаемых в дискретном выражении для  $S(f)$ , то при изменении частот дискретизации удобно использовать нормированные выражения, получающиеся умножением  $S(f)$  на множитель  $1/M = 4/N$ . При такой нормировке функциональные различия в зависимостях  $S(f)$ , обусловленные использованием сигналов, измеренных при разных частотах дискретизации, выявляются более явно.

Таким образом, при анализе сложного хаотического сигнала при фликкер-шумовой спектроскопии

определяется совокупность параметров, характеризующих корреляционные взаимосвязи в последовательностях нерегулярностей-скачков и нерегулярностей-всплесков, свойственные данному сигналу, определяемому с частотой дискретизации  $f_d$ . Анализ зависимостей  $\Phi^{(2)}(\tau)$  и  $S(f)$ , рассчитываемых на основе временных рядов с уменьшающей частотой дискретизации, позволяет оценить меру "устойчивости" параметров  $\sigma_1$ ,  $T_1$  и  $H_1$ , определяемых на основе  $\Phi^{(2)}(\tau)$ , и меру вариабельности параметров  $S_s(0)$ ,  $T_0$  и  $n_0$ , относящихся к зависимости  $S(f)$ .

## Список литературы

1. Малинецкий Г. Г. Введение в нелинейную динамику. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 256 с.
2. Стругинский А. В., Мурашко В. В. Электрокардиография. М.: Медпресс-информ, 2004. 320 с.
3. Тимашев С. Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит, 2007. 248 с.
4. Тимашев С. Ф., Встовский Г. В. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе хаотических временных рядов динамических переменных и проблема отношения "сигнал — шум" // Электрохимия. 2003. Т. 39. С. 156—169.
5. URL: [www.PhysioNet.org](http://www.PhysioNet.org)

N. T. Abdullayev<sup>1</sup>, Associate Professor, e-mail: a.namik46@mail.ru,

M. M. Gasankuliyeva<sup>2</sup>, Graduate Student,

<sup>1</sup> Azerbaijani Technical University

<sup>2</sup> Azerbaijani State Oil Academy

## Informative Parameters and Fluctuation Dynamics of Electrocardiograms at Flicker-Noise Spectroscopy

*On the basis of discretely fixed temporary ranks of electrocardiographic signals the analysis of spectral power and the transitional differential moments of the second order is made. Such analysis allows to receive the informative diagnostic parameters estimating a functional condition of cardiovascular system of the patient. The variation of the used sampling frequencies can be one of the factors allowing to estimate fluctuation dynamics of electrocardiograms and to allocate a contribution of irregularities to the analyzed real signals.*

**Keywords:** flicker-noise spectroscopy, electrocardiography, differential diagnostics, informative parameters, frequency of sampling of a signal

### References

1. Malineckij G. G. *Vvedenie v nelinejnuju dinamiku*, Moscow: Jeditorial URSS, 2002, 256 p.

2. Strutynskij A. V., Murashko V. V. *Jelektrokardiografija*. Moscow: Medpress-inform, 2004. 320 p.

3. Timashev S. F. *Flicker-shumovaja spektroskopija: informacija v haoticheskih signalah*, Moscow: Fizmatlit, 2007. 248 p.

4. Timashev S. F., Vstovskij G. V. Flicker-shumovaja spektroskopija v analize haoticheskih vremennyh rjadov dinamicheskikh perezmenenij i problema odnoshenija "signal — shum", *Jelektrohimija*, 2003, vol. 39, pp. 156–169.

5. URL: [www.PhysioNet.org](http://www.PhysioNet.org)

ИНФОРМАЦИЯ

16–21 мая 2016 г.,

г. Ростов-на-Дону — г. Сочи

1-я Международная научная конференция

## "ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕХНИКЕ И НА ПРОИЗВОДСТВЕ" (ИТИ'16)

### НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

- Модели представления и методы извлечения знаний
- Интеллектуальный анализ данных
- Нечеткие множества, нечеткие отношения и родственные им формализмы
- Теория возможности и теория свидетельств
- Неклассические логики и правдоподобный вывод
- Моделирование НЕ-факторов в интеллектуальных системах
- Мягкие вычисления и измерения, вычислительный интеллект
- Лингвистические модели и гранулярные вычисления, вычисления со словами и перцептами
- Принятие решений и интеллектуальные системы поддержки принятия решений
- Мультимножества и нечеткие мультимножества
- Гибридные нечеткие и вероятностные модели
- Алгебраические байесовские сети и сети доверия
- Нейронные сети, нейроинформатика и нейроинтеллект
- Когнитивное моделирование и когнитивные агенты
- Классификация, распознавание и обучение
- Эволюционное моделирование, бионические и генетические алгоритмы
- Многоагентные системы и распределенный ИИ
- Искусственная жизнь, интеллект роя, адаптивное поведение
- Прикладные интеллектуальные системы динамического типа
- Автоматизация и интеллектуализация энергетических и транспортных систем
- Защита информации и информационная безопасность
- Интеллектуальные информационные технологии в образовании

### КОНТАКТЫ ИТИ'16

Суханов Андрей Валерьевич (+ 7-989-720-65-53; [iiti16@rgups.ru](mailto:iiti16@rgups.ru))

Самсонов Владимир Леонидович (+ 7-903-470-68-34; [samsonov.sem@gmail.com](mailto:samsonov.sem@gmail.com))