

А. А. ВОРОНИН, И. А. ДМИТРИЕВ, Г. Н. ЛУКЬЯНОВ, Л. А. РЫБИНА

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЧЕЛОВЕЧЕСКОМ ОРГАНИЗМЕ

Представлен приборный комплекс для совместного исследования процессов дыхания и сердечной деятельности человека. Комплекс состоит из прибора для измерения характеристик дыхания и кардиоритмоанализатора „Эксперт — 01“, объединенных в единую систему. Проведены результаты исследования взаимодействия дыхательной и сердечно-сосудистой систем организма.

**Ключевые слова:** измерительный комплекс, ринологический прибор, датчики температуры, анализ процессов.

Применение измерительных приборов и систем для комплексных исследований организма человека дает возможность получить новые данные о характере взаимодействия его органов.

Система для совместного исследования сердечной деятельности и дыхательных процессов создана на кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики [1]. Система представляет собой измерительный комплекс, в состав которого входят многоканальный ринологический прибор, позволяющий регистрировать температуру воздуха непосредственно в носовой полости человека, не искажая при этом естественных характеристик выдыхаемого воздуха, а также кардиоритмоанализатор (далее — кардиограф) „Эксперт — 01“ производства НПО „Маркиз“ (Санкт-Петербург), представляющий собой портативный прибор, подключаемый к компьютеру через последовательный порт.

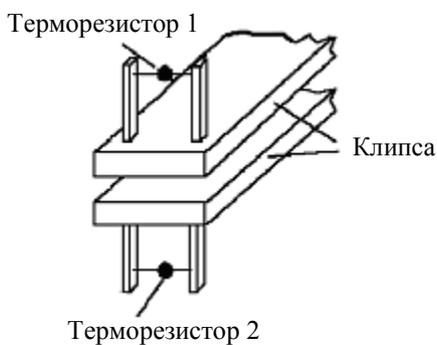


Рис. 1

Сенсорный элемент ринологического прибора — клипса миниатюрных размеров — располагается на перегородке носа, внутри его полостей (рис. 1). На внешней поверхности обеих половин клипсы находятся датчики (терморезисторы СТ1-18, отградуированные в диапазоне от 20 до 40 °С), регистрирующие температуру на входе в носовую полость. Миниатюрные размеры клипсы и датчиков (толщина каждой из половин клипсы составляет 4 мм, датчика — 0,5 мм) позволяют измерять пульсации температуры в носовых ходах при естественном дыхании [1]. Температура воздуха окружающей среды в течение времени вдоха и выдоха изменяется до температуры тела человека.

При проведении экспериментов для получения сигнала электрокардиограммы и последующего его представления на мониторе компьютера использовался кардиограф „Эксперт — 01“ с двумя датчиками, устанавливаемыми на руки пациента. Этот прибор обеспечивает частоту дискретизации 3000 Гц при диапазоне входных напряжений от 0,03 до 5 мВ в диапазоне частоты сокращений сердечной мышцы от 36 до 180 ударов/мин.

Измерительный комплекс создан для выявления общих закономерностей взаимодействия дыхательной и сердечно-сосудистой систем организма. Для функционирования комплекса разработано программное обеспечение, синхронизирующее работу приборов и приводящее результаты их измерений к одному моменту времени (рис.2).

Для проведения экспериментов по исследованию взаимосвязи процессов дыхания и сердечных сокращений были привлечены как здоровые люди, так и больные с различными ды-

хательными и сердечными патологиями. На рис. 3 графически представлены синхронизированные результаты измерения температуры ( $T$ ) воздуха в носовой полости (кривая 1) и показаний электрокардиограммы ( $U$ ) здорового человека (кривая 2) в зависимости от времени. График демонстрирует характерную синхронизацию процессов на частоте дыхания.

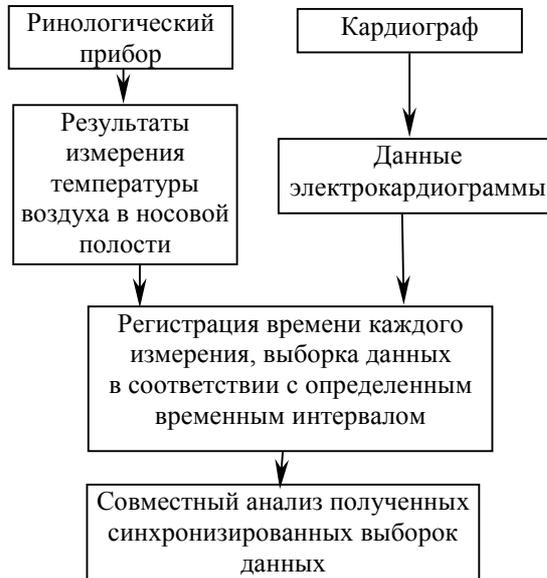


Рис. 2

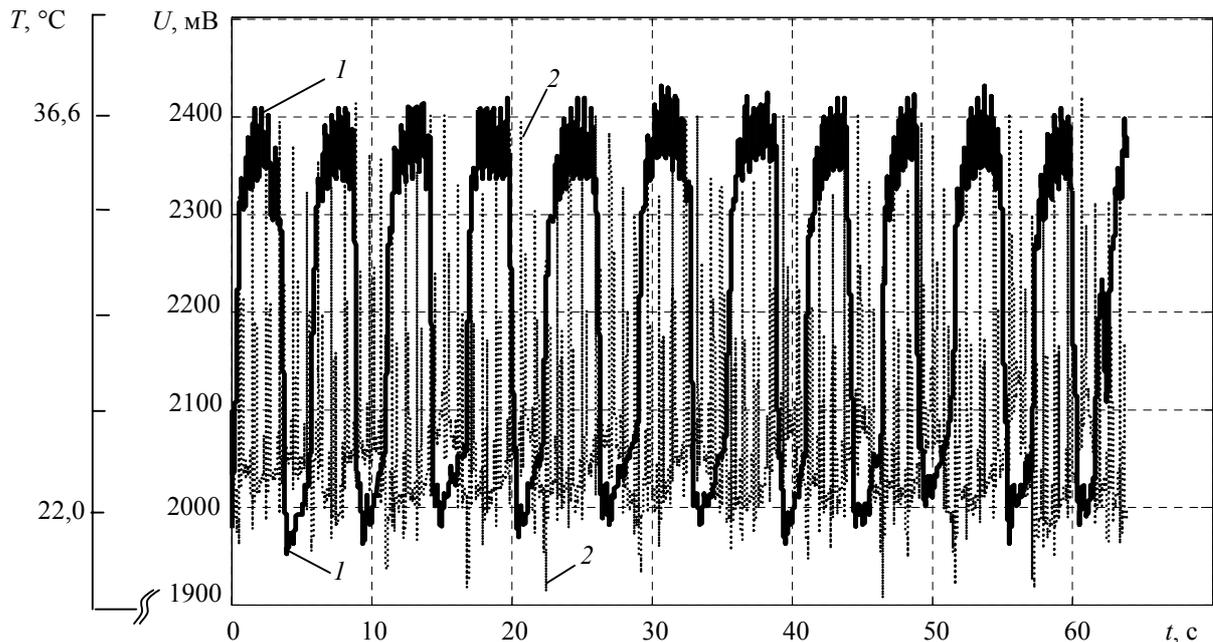


Рис. 3

Для выявления особенностей взаимодействия дыхательной и сердечно-сосудистой систем определялась взаимная спектральная плотность мощности ( $S$ ) для полученных зависимостей (рис. 4). Характерные частоты, на которых происходит взаимодействие систем у здорового человека, наблюдаются при  $f = 0,3 \dots 0,8$  Гц (см. рис 4, *a*), а у пациентов с заболеваниями сердца — на частоте  $f \approx 1$  Гц (см. рис. 4, *b*).

Для исследуемого процесса по методу задержек производилось восстановление фазовой траектории (аттрактора) в пространстве  $(x(t), x(t+\tau), x(t+2\tau), \dots, x(t+n\tau))$ , где  $n$  — размерность пространства вложения. На рис. 5 приведены фазовые траектории: *a* — процесса изменения

температуры воздуха при дыхании здорового человека;  $\bar{b}$  — то же, для больного астмой;  $\bar{v}$  — процесса изменения электрических потенциалов сердца здорового человека;  $\bar{z}$  — то же, для человека с заболеванием сердечно-сосудистой системы.

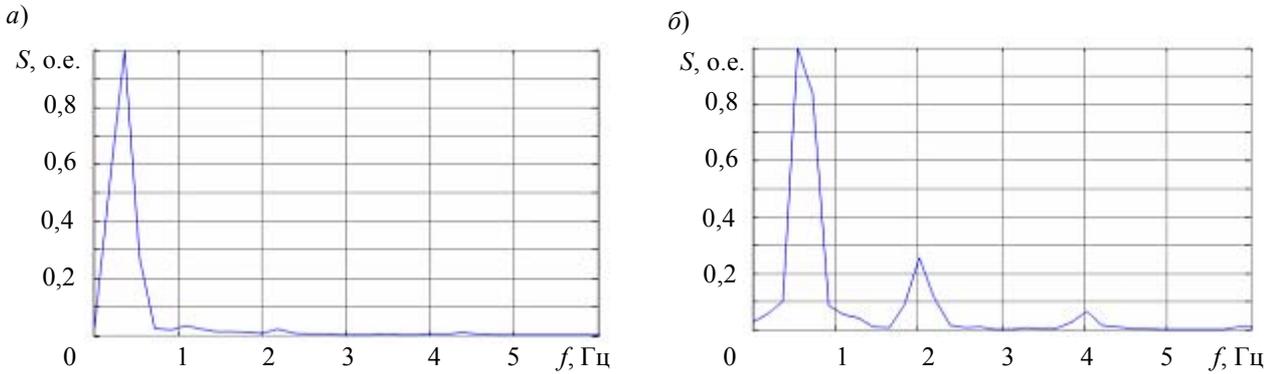


Рис. 4

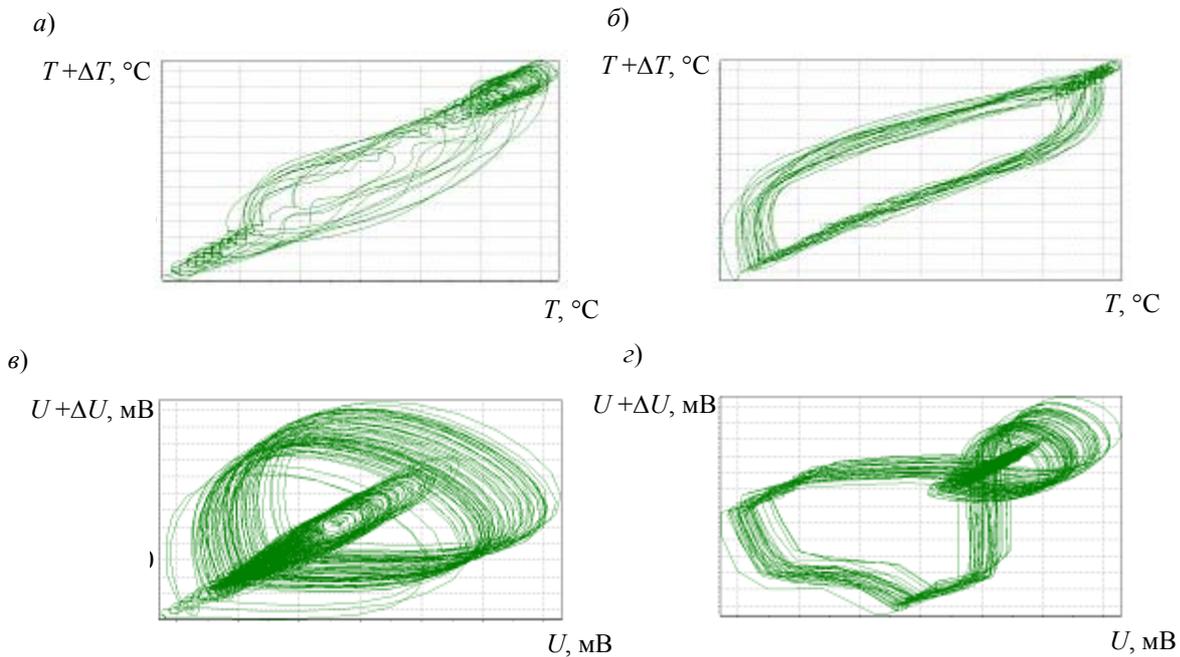


Рис. 5

Далее, по методу Грассбергера и Прокаччия [2] вычислялись корреляционный интеграл  $C(\epsilon)$  и корреляционная размерность  $D_2$ , а также корреляционная энтропия  $K_2$ :

$$C(\epsilon) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m H(\epsilon - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|),$$

где  $H$  — функция Хевисайда:

$$H = \begin{cases} 1, & (\epsilon - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|) \geq 0; \\ 0, & (\epsilon - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|) < 0, \end{cases}$$

здесь  $\epsilon$  — размер ячейки разбиения фазового пространства,  $\mathbf{x}_{ij}$  — параметры выборки;

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log C(\epsilon)}{\log \epsilon};$$

$$K_2 = \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{ED \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \log \left( \sum_{i_1 \dots i_N} \frac{C_{ED}(\varepsilon)}{C_{ED+1}(\varepsilon)} \right),$$

где  $C_{ED}(\varepsilon)$  — корреляционный интеграл для размерности вложения ED (ED — embedded dimension) [3].

В результате вычислений были получены значения корреляционной размерности, а также корреляционной энтропии для процессов дыхания и сердечной деятельности.

Применение разработанного комплекса позволило осуществить динамические измерения параметров процессов дыхания и сердечной деятельности, что, в свою очередь, позволяет сделать следующие важные выводы:

— для практически здорового человека характерно динамическое взаимодействие дыхательной и сердечно-сосудистой систем в основном на частоте дыхания, а также слабое взаимодействие на более высоких частотах;

— для людей с заболеванием сердца характерно более сильное взаимодействие на частотах, превышающих частоту дыхания;

— наибольшая величина спектральной плотности мощности, соответствующей частоте дыхания, у пациента с патологиями сердца, как правило, меньше, чем у здорового человека: это, с учетом более высоких амплитуд пиков на частотах выше 1 Гц, свидетельствует о возрастании мощности взаимодействия, приходящейся на сердечно-сосудистую систему при наличии заболеваний;

— для всех пациентов, при положении тела стоя, характерно общее возрастание (но у здоровых людей в среднем ниже, чем у больных) корреляционных размерностей для процессов дыхания и деятельности сердца;

— у пациентов с патологическими изменениями сердечно-сосудистой системы при смене положения тела отмечено более резкое (в некоторых случаях скачкообразное) изменение размерностей исследуемых процессов, чем у здоровых людей;

— корреляционная энтропия процесса сокращений сердечной мышцы у всех пациентов превышает данный показатель при изменении температуры выдыхаемого воздуха, что свидетельствует о меньшей скорости потери информации применительно к процессу дыхания; таким образом, процесс дыхания в некотором узком временном интервале является более детерминированным;

— в результате смены положения тела в пространстве у большинства пациентов наблюдалось изменение корреляционной энтропии обоих исследуемых процессов, однако оно носит разнонаправленный характер и, учитывая возможное значение погрешности измерений, не может быть принято во внимание.

Разработанный измерительный комплекс, как подтверждают приведенные выводы, позволяет не только получать данные о процессах дыхания и сердцебиения, но и количественно оценивать взаимосвязь этих процессов в зависимости от состояния человека, в частности выявить процессы синхронизации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьянов Г. Н., Рассадина А. А., Дранишникова О. А. и др. Исследование тепло- и массообменных характеристик дыхания // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 5. С. 68—73.
2. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of strange attractors // Phys. Rev. Lett. 1983. N 50. P. 346—349.
3. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. М.: Мир, 1991. 368 с.

**Сведения об авторах**

- Алексей Анатольевич Воронин** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра теплофизики; E-mail: ale\_vog@ Rambler.ru
- Игорь Алексеевич Дмитриев** — ФГУП „НИИ промышленной и морской медицины“, Санкт-Петербург, руководитель группы
- Геннадий Николаевич Лукьянов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электроники; E-mail: gen-lukjanow@yandex.ru
- Лариса Александровна Рыбина** — канд. биол. наук; Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой  
электроники СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
07.12.09 г.