

УДК 615.47:681.2

Разработка и исследование микроэлектронного монитора параметров гемодинамики

Г.М. Алдонин*

*Сибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79¹*

Received 4.02.2011, received in revised form 11.02.2011, accepted 18.02.2011

В лаборатории медицинского приборостроения Института инженерной физики и радиоэлектроники (ИИФирЭ) Сибирского федерального университета (СФУ) разработаны аппаратно-программные комплексы (АПК) на базе холтеровских кардиомониторов МКМ-09 с возможностью дистанционной передачи информации о функциональном состоянии организма в диагностический центр. Эти комплексы обладают достаточной универсальностью и доступностью для широкого применения в клинической практике, в амбулаторных и бытовых условиях. АПК позволяет извлекать дополнительную информацию из совместного анализа различных биосигналов и их производных, например информацию о состоянии магистральных сосудов и изменении артериального сосудистого тонуса по скорости распространения пульсовой волны. Отличием программного обеспечения АПК на базе МКМ-09 является обеспечение структурного анализа био процессов и биосигналов нелинейными методами теории самоорганизации. Структурная организация био процессов (кардиоритма) и биосигналов биосистем выявляется при их вейвлет-преобразованиях. Она наглядно отражается на вейвлет-диаграммах и био процессов, и биосигналов.

Ключевые слова: мониторинг функционального состояния организма, аппаратно-программные средства, телемедицина, рекордеры холтеровского типа, кардиоритм, электрокардиосигнал, пульсовая волна кровотока, артериальное давление, время распространения пульсовой волны.

Введение

В связи с широким распространением сердечно-сосудистых заболеваний необходимо создание средств оперативного контроля сердечно-сосудистой деятельности (ССД) с возможностью дистанционной передачи информации о функциональном состоянии организма (ФСО) в диагностический центр. Аппаратно-программный комплекс мониторинга функционального состояния организма человека на основе разработанного в лаборатории медицинского приборостроения Института инженерной физики и радиоэлектроники (ИИФирЭ) Сибирского федерального университета (СФУ) микрокардиомонитора холтеровского типа МКМ-09 (рис. 1) с расширенными функциональными возможностями, в отличие от существующих в стране и за рубежом, позволяет извлекать дополнительную информацию из совместного анализа различ-

* Corresponding author E-mail address: GAldonin@sfu-kras.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved



Рис. 1. Рекордер МКМ-08

ных биосигналов и их производных, например фотоплетизмографическую информацию о состоянии сосудов и изменении артериального сосудистого тонуса по скорости распространения пульсовой волны.

Средства и методы

Холтеровский кардиомонитор МКМ-09 предназначен для накопления в режиме of-line и on-line КИ электрокардиосигналов (ЭКС) и пульсовой волны (ПВ) кровотока, сведений фонокардиограммы (ФКГ) и данных о сосудистом тонусе в цифровом виде от 5 мин до 24 ч. Сигналы передаются в персональный компьютер (ПК) для последующей их обработки и статистического, спектрального и структурного анализа кардиоинформации.

Аналоговая часть прибора содержит два канала: канал электрокардиосигнала и канал ПВ, к которым подключены, соответственно, электроды ЭКГ и фотоплетизмографический датчик. В цифровую часть входит микроконтроллер, АЦП, жидкокристаллический (ЖК) дисплей, кнопки управления, индикатор R-зубца и ММС карты памяти. АЦП по команде микроконтроллера преобразовывает аналоговый сигнал усилителей, приходящих на входы цифровой части. В зависимости от выбранного режима эти сигналы либо сохраняются в карте памяти, либо по интерфейсу USB передаются на компьютер.

С помощью кнопок управления и меню на ЖК-панели выполняется управление прибором и считывание статусной информации по работе. Для дальнейшей обработки сигналов и формирования базы данных сигналы в цифровом виде передаются в ПК для последующей их обработки.

АПК обеспечивает возможность передачи данных в удаленный кардиоцентр по телекоммуникационным каналам связи посредством e-mail, файлообменного сервера, серверного ПО системы телемедицинского on-line и of-line наблюдения за пациентами. Записанные в прибор данные передаются в ПК через USB-интерфейс либо переносом картой памяти. При применении USB-интерфейса загрузка данных в ПК осуществляется через ММС, наличие графического дисплея позволяет проводить измерения с использованием питания от ПК в режиме on-line.

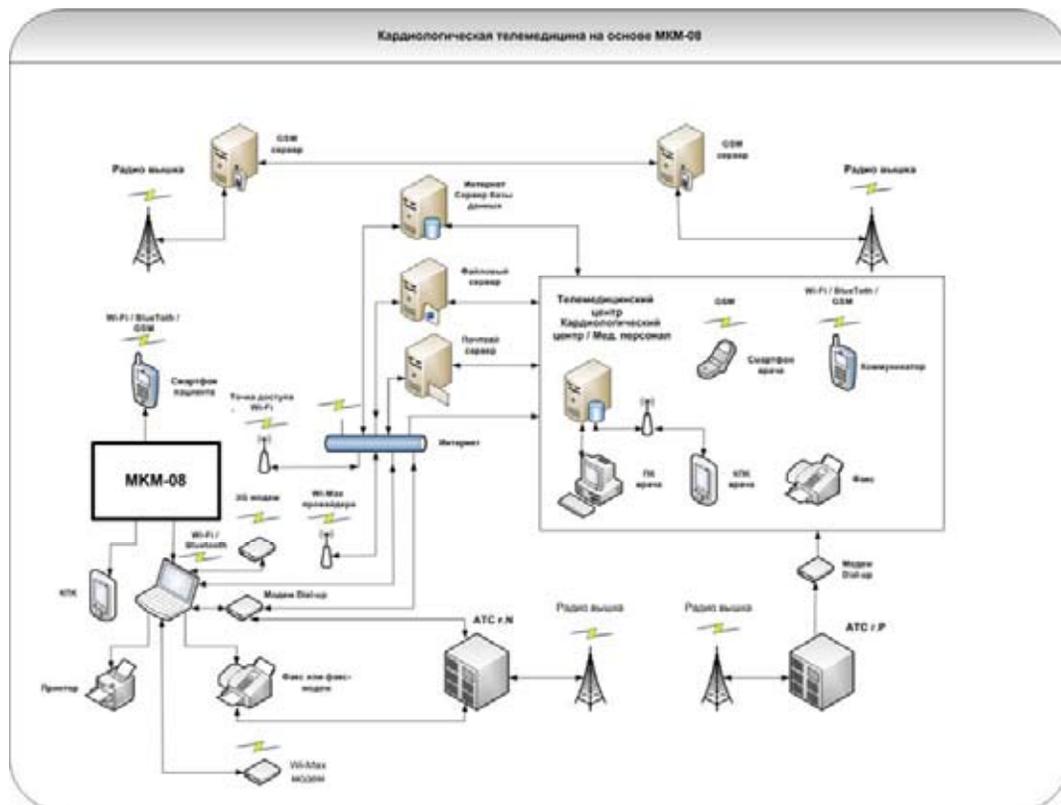


Рис. 2. Структура кардиологической телемедицины

Предусмотрена возможность дистанционной передачи информации через сети сотовой связи. АПК содержит три канала: канал ПВ, канал ЭКС и канал ФКС. Каждый канал имеет датчик-преобразователь, который воспринимает измеряемый физиологический параметр и преобразует его в электрический сигнал, усилитель, фильтр. Аналоговый сигнал преобразуется в АЦП, код накапливается в запоминающем устройстве и с помощью микроконтроллера обрабатывается и отображается на экране дисплея рекордера МКМ-08.

На рис. 2 приведена структура кардиологической телемедицины на базе АПК, использующая существующую инфокоммуникационную инфраструктуру посредством мобильных беспроводных и проводных технологий.

На рекордере МКМ-08 накапливаются данные о биосигналах и посредством Bluetooth или интерфейсного кабеля USB передаются в смартфон или PDA. Есть возможность с помощью программы «Теледиагностика» обработать и представить их в виде графического файла. В сети сотовых операторов графический файл в виде MMS-сообщения передается лечащему врачу. Схема реализации телемедицины посредством мобильных 3G/4G технологий на базе АПК выглядит следующим образом. На рекордере МКМ-08 накапливаются данные о биосигналах и посредством Bluetooth или интерфейсного кабеля USB передаются в ноутбук. Используя 3G W-CDMA модем или 4G Wi-Max модем, которые могут быть встроены в ноутбук, непосредственно через операторов связи по интернету передаем как .wav или графический файл

в кардиологический центр. Для передачи могут быть использованы почтовые серверы (mail), файловые серверы (ftp), веб-серверы (web) с загрузкой файлов и разграниченным доступом. Могут применяться веб-серверы самого кардиологического центра. Приоритетными сетями передачи данных являются 3G/4G или наземные с коммутируемым доступом (dial-up по телефонным линиям). Все приведенные методы передачи обеспечивают передаваемые объемы биоинформации.

Результаты

Для объективного анализа состояния сердечно-сосудистой системы необходим постоянный контроль проводящей нервной системы и сосудистой системы сердца, статистический и спектральный анализ биосигналов каждой из систем [4-6]. На рис. 4, 5 приведены примеры отчетов диагностики ФСО.

Программное обеспечение «KSRG» и «Диагностика» проводит анализ основных параметров гемодинамики: КИГ, ЭКГ, ПВ, ФКГ, контроль изменения артериального давления ($A_{D_{cp}}$) на основе измерения времени распространения пульсовой волны (ВРПВ), определяются восемнадцать параметров по вариабельности сердечного ритма (ВСР-диагностики) [2], индекс напряжения (ИН) (стресс-индекс), индекс эффективности (ИЭ) коррекции функционального состояния организма, индекс сосудистого тонуса (ИСТ).

Обеспечивается суточное мониторирование кардиосигналов для дальнейшей обработки и передачи лечащему врачу по существующей инфокоммуникационной инфраструктуре, в частности, по сотовой связи (рис. 4, б). Фонокардиография обеспечивает регистрацию сердечных тонов и сердечных шумов. Фотоплетизмография применяется для исследования артериальной системы у человека, дает возможность оценить состояние артерий эластического и мышечного типа, состояние венозного, артериального давления.

Отличием программного обеспечения АПК на базе МКМ-08 является обеспечение структурного анализа биопроцессов и биосигналов нелинейными методами теории самоорганизации. Структурная организация биопроцессов (кардиоритма) и биосигналов биосистем является при их вейвлет-преобразованиях. Она наглядно отражается на вейвлет-диаграммах (рис. 3, 4).

В ренормгрупповом подходе скелетные функции (*скелетоны*) вейвлет-преобразования как картина линий локальных экстремумов поверхностей выявляют структуру анализируемого процесса, а скейлинги – масштабную инвариантность или самоподобие (рис. 5). Оценкой структурной организации гомеостаза в ультраметрическом пространстве служит фрактальная размерность деревьев Кейли.

Биосистемы как высокоорганизованные структуры обладают гармонической квазикристаллической симметрией и фрактальной самоорганизацией по принципу масштабно-инвариантного самоподобия. В синергетическом аспекте это определяет их фрактальную структуру с выраженным самоподобием их элементов, имеющих масштабный порядок, или скейлинг. Фрактальная структура квазикристаллического типа, масштабно-инвариантное самоподобие (скейлинг), спектр вида $1/f^\beta$ являются признаками самоорганизации в природных системах и критерием структурной устойчивости биосистем. Установление определенного скейлинга представляет интерес в диагностике нормы, преморбидности и патологии состоя-

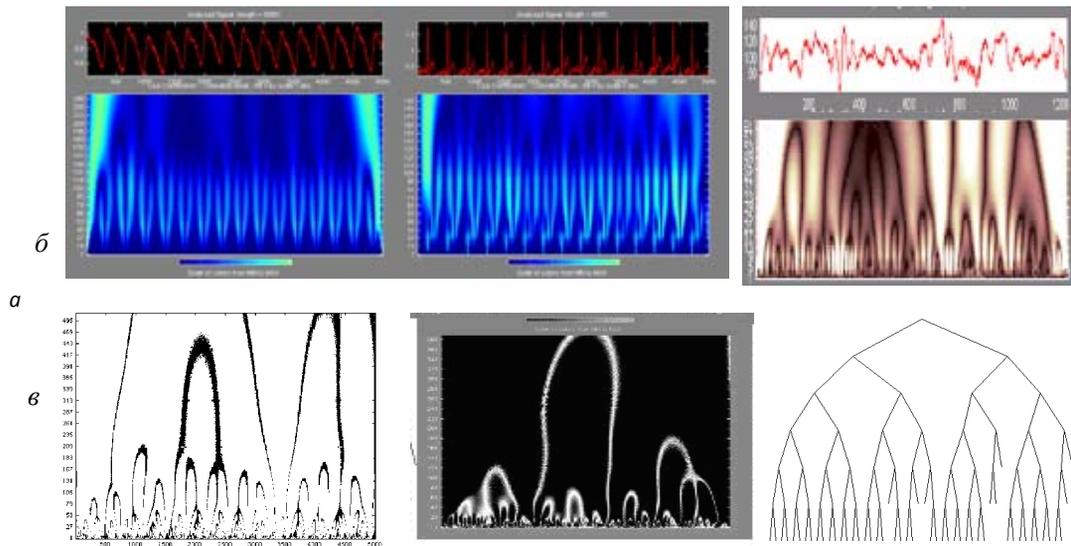


Рис. 5. ФКС, ЭКГ, ПВ – а, их вейвлет-преобразование – б и скелетоны – в

ния здоровья, а фрактальная размерность деревьев Кейли вейвлет-диаграмм есть количественная мера структурной организации биосистем.

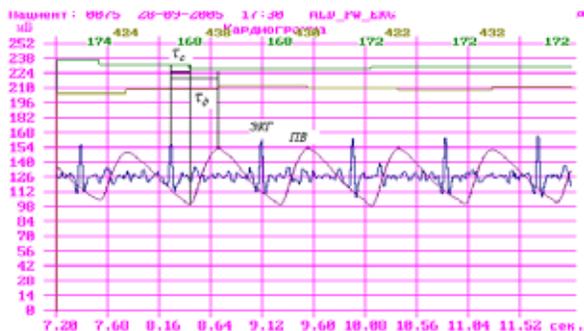
При мониторинге сердечно-сосудистой системы важно контролировать изменение артериального давления (АД). В последнее время все больший интерес проявляется к контролю состояния артериального и венозного сосудистого тонуса по скорости распространения пульсовой волны [3]. Линейная скорость кровотока по артериям обычно не превышает 0,5 м/с. С возрастом эластичность сосудов снижается, и это приводит к увеличению скорости распространения пульсовой волны, что позволяет количественно оценить с помощью измерения времени распространения пульсовой волны (ВРПВ) параметры кровотока в сосудах различных отделов кровеносной системы. Совместный анализ ЭКС и ПВ дает возможность мониторировать состояние артериального давления с помощью ВРПВ, поэтому наряду с мониторингом ЭКС, ФКС и ПВ существует возможность теми же аппаратными средствами контролировать такой важный показатель ФСО, как состояние сосудистого тонуса и его реакцию на какие-либо воздействия.

Изменение состояния артериального сосудистого тонуса сказывается на времени распространения пульсовой волны (ВРПВ), которая измеряется по отсчетам задержки между R-зубцом ЭКС максимумом ПВ (рис. 6, а).

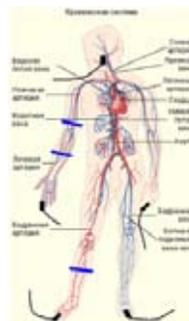
Алгоритм измерения ВРПВ ПО KSRG заключается в следующем. Отсчеты из массива данных на интересующем интервале наблюдений подвергаются фильтрации вначале вычислением скользящего среднего \tilde{X}_i по ЭКС и ПВ:

$$\tilde{X}_i = \frac{1}{T} \sum_{i=\frac{T}{2}}^{i=\frac{T}{2}+T} X_i, \quad (1)$$

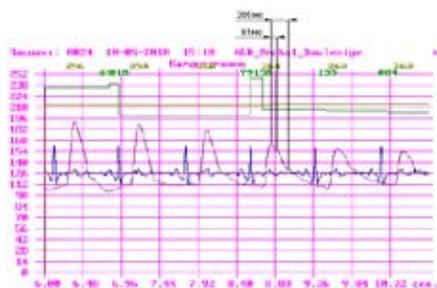
где T – интервал усреднения, X_i – текущие отсчеты. Затем для более точного определения R-зубца ЭКС вычисляется скользящее среднее \tilde{X}_j по ЭКС:



а

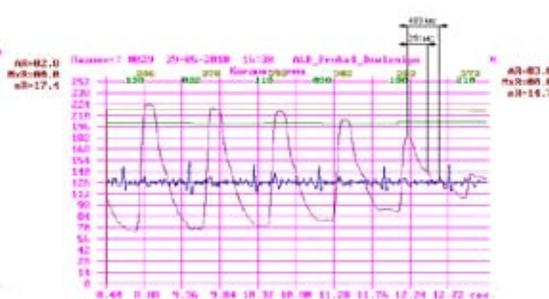


б



Опыт с пережиманием руки в плече

в



Опыт с пережиманием руки в предплечье

Рис. 6. Совместная запись сигналов ЭКГ и ПВ и измерение времени распространения пульсовой волны (ВРПВ) в фазе систолы (верхняя линия) и диастолы (нижняя линия) – а, опыты с определением зауужения сосуда – б, в

$$\tilde{X}_j = X_j - \frac{1}{T} \sum_{j=-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} X_j. \quad (2)$$

Для повышения помехоустойчивости определения ВРПВ по значениям \tilde{X}_j строится гистограмма, имеющая характерную «полочку», которая определяет уровень порога истинного R-зубца (рис. 6, б). После этого определяется точка максимального значения R-зубца (пик ЭКС), максимум и минимум пульсовой волны. Временной отрезок между ними ΔT означает ВРПВ в систолической – τ_c и диастолической фазе – τ_d :

$$T_{\max \text{ ПВ}} - T_{\max \text{ ЭКС}} = \tau_d; T_{\min \text{ ПВ}} - T_{\max \text{ ЭКС}} = \tau_c. \quad (3)$$

Проводили опыты с определением места зауужения просвета в сосудае (например, для определения места образования атеросклеротических бляшек, рис.6, б). Эксперименты показали такую возможность при фотоплетизмографическом анализе.

Измеряется расстояние от сердца до датчика ПВ и время от вершины пульсовой волны, за которое пульсовая волна проходит путь от сердца. На фотоплетизмограммах определяются отклонения в виде флуктуаций формы пульсовой волны и её время от вершины пульсовой волны, а также местонахождение зауужения артерий:

$$L_{a\bar{e}} = \frac{t_{a\bar{e}}}{t_{\bar{e}i}} \cdot L_{\bar{e}i}, \quad (4)$$

где $L_{\text{пл}}$ – расстояние от сердца до предполагаемого местоположения сужения артерии, $t_{\text{пл}}$ – время распространения пульсовой волны от вершины ПВ до флуктуации, $t_{\text{кон}}$ – время распространения пульсовой волны от вершины ПВ до вершины дикротической волны, $L_{\text{кон}}$ – расстояние от сердца до измеряемой точки. На рис. 6 отражен опыт с пережиманием руки жгутом в плече (а) и в предплечье (б). $t_{\text{пл}} = 61$ мс, а $t_{\text{кон}} = 205$ мс. Расстояние от сердца до измеряемой точки $L_{\text{кон}} = 92$ см. Таким образом;

$$L_{a\bar{e}} = \frac{61}{205} \cdot 92 = 28 \text{ м}.$$

Обсуждение результатов

Для оценки состояния ФСО целесообразно объединить основные характеристики сосудистого тонуса в общие функционалы в виде индексов.

Определения модифицированного фотоплетизмографического индекса (МФПИ) Его отличие от применяемого на практике ФПИ в том, что для его вычисления не требуется определение постоянной составляющей венозного кровотока, что существенно упрощает и облегчает определение индекса, поскольку величина венозного кровотока значительно превышает пульсации артериальной крови, точное определение индекса в связи с этим трудоемко. Определяется модифицированный фотоплетизмографический индекс по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \text{МФПИ} &= (A_1 / A_2) \cdot 100 \%, \\ \text{МФПИ} &= (A_2 / A_3) \cdot 100 \%, \end{aligned} \quad (5)$$

где A_1 – амплитуда пульсовой волны в положении «рука внизу»; A_2 – в положении «рука на уровне сердца»; A_3 – в положении «рука вверх».

На рис. 7 показана зависимость амплитуды пульсовой волны от различных положений руки относительно вертикали.

Определения индекса сосудистого тонуса (ИСТ) (4), величина которого, с одной стороны, зависит от ВРПВ, а с другой – отражает разность ВРПВ в систолической (τ_c) и диастолической τ_o : фазах



Рис. 7. Фотоплетизмограмма при различных положениях руки

$$ИСТ = T_{\tau_0}^{\tau_c} \quad (5)$$

Экспериментальные измерения задержки ВРПВ от изменения САД приведены в табл. 1 и на рис. 8. ВРПВ изменялось за счет изменения давления при нагрузке. В качестве нагрузки использовали приседания от 5 до 20 раз. Разность ВРПВ до, после и во время восстановления показывает однозначную связь ВРПВ с артериальным давлением в сосуде, измеренным сертифицированными амбулаторными мониторами VPLab и монитором кровяного давления A&D Medical и ВРПВ, измеренным МКМ-08 (рис. 8).

Статистическая обработка данных, представленная на рис. 9, дает основание считать оценку ВРПВ достоверной ввиду ее близости к нормальному закону распределения.

Таблица 1. Измерение ЧСС, ДАД, САД на мониторе VPLab и ВРПВ на МКМ-08

ФИО	Возраст	Этап	САД	ДАД	Пульс	Разность			Среднее
Е. Е.	20	До	122	63	87	0,176	0,176	0,176	0,176
		После	156	84	102	0,150	0,144	0,156	0,150
		Восстановление	133	70	83	0,180	0,186	0,180	0,182

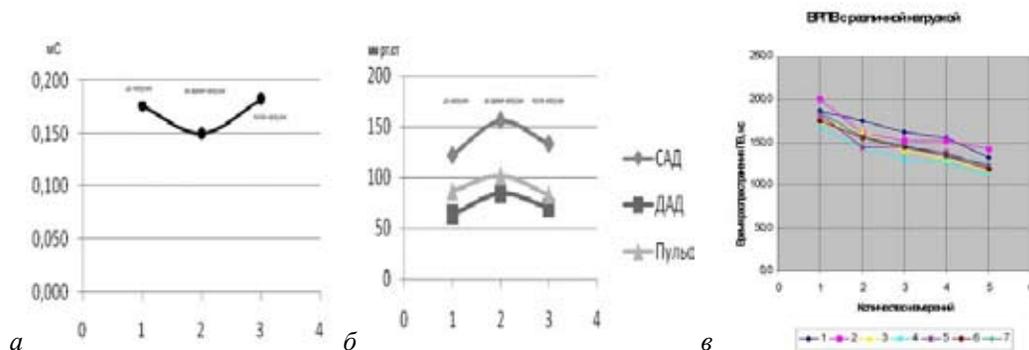


Рис. 8. Измерение ВРПВ рекордером МКМ-09 – а; ЧСС, САД и ДАД на 3-х этапах на мониторе VPLab – б; в – ВРПВ семи пациентов на пяти этапах: 1 – до нагрузки; 2 – после нагрузки в 5 приседаний; 3 – 10; 4 – 15 и 5 – 20 приседаний

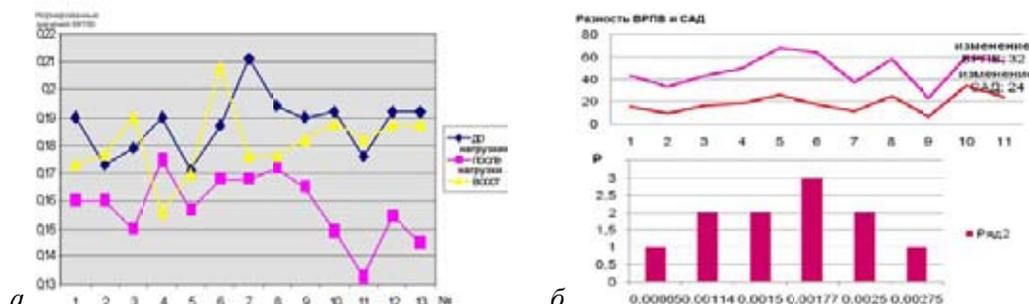


Рис. 9. Нормированные значения ВРПВ (а) и распределение разностей ВРПВ и САД (б)

Заключение

Аппаратно-программные средства контроля за функциональным состоянием организма (ФСО) разработаны для кардиолога, терапевта, валеолога, психолога, специалистов по функциональной диагностике и могут использоваться как в клинических, так и в бытовых условиях. АПК на базе холтеровских кардиомониторов МКМ-08 имеют возможность дистанционной передачи информации о ФСО в диагностический центр.

В отличие от существующих в стране и за рубежом аналогов АКП позволяет извлекать дополнительную информацию из совместного анализа различных биосигналов и их производных, он обладает достаточной универсальностью и доступностью для широкого применения в клинической практике, в амбулаторных и бытовых условиях.

Отличием программного обеспечения АПК МКМ-08 является обеспечение структурного анализа биопроцессов и биосигналов нелинейными методами теории самоорганизации. Структурная организация биопроцессов (кардиоритма) и биосигналов биосистем выявляется при их вейвлет-преобразованиях.

Статья публикуется при поддержке Программы развития Сибирского федерального университета.

Список литературы

1. Алдонин Г. М. Робастность в природе и технике /Г. М. Алдонин. – М.: Радио и связь, 2003. – 367 с.
2. Баевский Р. М. Современное состояние исследований по variability сердечного ритма в России /Р. М. Баевский, Г. Г. Иванов, Г. Г. Рябыкина // Компьютерная электрокардиография на рубеже столетий: Материалы международного симпозиума. – М., 1999. – С. 21–25.
3. Кац В.А., Клочков В.А., Дементиевский В.А., Шерстюкова О.Н. Аппаратура для контроля среднего артериального давления. Свидетельство на полезную модель РФ № 35064 U1, Опубл. 27.12.2003.
4. Алдонин Г.М. Холтеровский монитор контроля параметров гемодинамики / Г.М. Алдонин, С. П. Желудько, В.Б. Новиков, Д.И. Ноженков // Биотехносфера. – СПб, 2010. – № 1(7). – С. 17-23
5. Алдонин Г.М. Индекс эффективности коррекции функционального состояния организма / Г.М. Алдонин, С.П. Желудько // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 3 (2009 2) с. 311-317.
6. Алдонин Г.М. Структурный анализ на основе полифункционального мониторинга сердечно-сосудистой системы / Г. М. Алдонин, С. П. Желудько // Известия ТПУ. – Т. 313, №4.

A Hardware-Software Complexes Monitoring of Hemodynamic

Gennady M. Aldonin
*Siberian Federal University,
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

For a number of problems of medical research has developed a series of hardware and software systems analysis of the functional state of the organism. A hardware-software complexes (HSC) on the basis of Holter heart monitor MCM-08 with the possibility in whole remote transmission of information about the functional state of the organism in the diagnostic center. Sufficiently flexible and accessible is ensured for widespread use in clinical practice, in outpatient and at home. Unlike existing in the country and overseas counterparts, HSC allows seeking the engagement of additional information from the joint analysis of different biosignals and their derivatives, such as information about the state magist-sectoral changes in blood vessels and vascular tone in the velocity of propagation of the pulse wave. The difference in MCM-09 to pro-vide structural analysis of bioprocesses and biosignals nonlinear methods of theory of self-organization. Structural organization of bioprocesses (cardiac) and biosignals Biosystems revealed in their wavelet-transforms. She clearly is reflected in the wavelet-diagramms bioprocess and biosignals

Keywords: monitoring the functional state of the organism, the hardware-software, telemedicine, Holter Recorders type, elektrokardiosignal, pulse wave, blood flow, blood pressure, time of pulse wave.
