

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ*

Представлен разработанный в лаборатории медицинского приборостроения института инженерной физики и радиозлектроники (ИИФиРЭ) Сибирского федерального университета (СФУ) аппаратно-программный комплекс на базе холтеровских кардиомониторов МКМ-09 с возможностью дистанционной передачи информации о функциональном состоянии организма в диагностический центр.

Ключевые слова: мониторинг функционального состояния организма, аппаратно-программные средства, теле-медицина, рекордеры холтеровского типа, артериальное давление, время распространения пульсовой волны.

В связи с широким распространением сердечно-сосудистых заболеваний необходимо создание средств оперативного контроля сердечно-сосудистой деятельности (ССД). В системах обработки биосигналов важно в максимальной степени обеспечить извлечение содержащейся в них информации. Национальные рекомендации ВНОК и ОССН по диагностике и лечению ХСН [1] устанавливают основные «зоны интереса» при клиническом обследовании больного сердечной недостаточностью (табл. 1).

В современных европейских рекомендациях по диагностике и лечению артериальной гипертонии указано, что маркером «субклинического поражения органов» при артериальной гипертонии является определение лодыжечно-плечевого индекса ($< 0,9$) и скорости распространения пульсовой волны (> 12 м/с) [2]. Последний показатель отсутствовал в национальных рекомендациях по профилактике, диагностике и лечению артериальной гипертонии, но, вероятно, будет включен в них после очередного пересмотра [3].

В соответствии с этими рекомендациями разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) полифункционального мониторинга состояния организма человека на основе рекордера холтеровского типа МКМ-09 (рис. 1) с расширенными функциональными возможностями в отличие от существующих в стране и за рубежом.

АПК позволяет извлекать дополнительную информацию из совместного анализа различных биосигналов и их производных, например информацию о состоянии магистральных сосудов и изменении артериального сосу-

дистого тонуса по скорости распространения пульсовой волны. Отличием программного обеспечения АПК на базе МКМ-09 является обеспечение структурного анализа биопроцессов и биосигналов нелинейными методами теории самоорганизации. Структурная организация биопроцессов (кардиоритма) и биосигналов биосистем выявляется при их вейвлет-преобразованиях. Она наглядно отражается на вейвлет-диаграммах и биопроцессов, и биосигналов.



Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс мониторинга функционального состояния организма человека на основе рекордера холтеровского типа МКМ-09

Таблица 1

Шкала оценки клинического состояния при ХСН (ШОКС) (модификация В. Ю. Мареева, 2000)

1	Одышка: 0 – нет, 1 – при нагрузке, 2 – в покое
2	Изменился ли за последнюю неделю вес: 0 – нет, 1 – увеличился
3	Жалобы на перебои в работе сердца: 0 – нет, 1 – есть
4	В каком положении находится в постели: 0 – горизонтально, 1 – с приподнятым головным концом (2 + подушки), 2 – плюс просыпается от удушья, 3 – сидя
5	Набухшие шейные вены: 0 – нет, 1 – лежа, 2 – стоя
6	Хрипы в легких: 0 – нет, 1 – нижние отделы (до 1/3), 2 – до лопаток (до 2/3), 3 – над всей поверхностью легких
7	Наличие ритма галопа: 0 – нет, 1 – есть
8	Печень: 0 – не увеличена, 1 – до 5 см, 2 – более 5 см
9	Отеки: 0 – нет, 1 – пастозность, 2 – отеки, 3 – анасарка
10	Уровень САД: 0 – > 120 мм рт. ст., 1 – (100...120 мм рт. ст.), 2 – < 100 мм рт. ст.

*Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».

АПК позволяет извлекать дополнительную информацию из совместного анализа различных биосигналов и их производных, например фотоплетизмографическую информацию о состоянии сосудов и изменении артериального сосудистого тонуса по скорости распространения пульсовой волны.

Холтеровский кардиомонитор МКМ-09 предназначен для накопления в режимах офлайн и онлайн КИ, электрокардиосигналов (ЭКС) и пульсовой волны (ПВ) кровотока, записи фонокардиограмм (ФКГ) и данных о сосудистом тонусе в цифровом виде от 5 мин до 24 ч. 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.

Сигналы передаются в персональный компьютер (ПК) для последующей их обработки и статистического, спектрального и структурного анализа кардиоинформации. Обеспечивается суточное мониторирование кардиосигналов и возможность их передачи лечащему врачу по существующей инфокоммуникационной инфраструктуре, в частности, по сотовой связи.

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 карта памяти MMC. 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 персональный компьютер (ПК).

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. Примеры отчетов диагностики ФСО приведены на рис. 2, 3. Программное обеспечение KSRG и «Диагностика» обеспечивает анализ основных парамет-

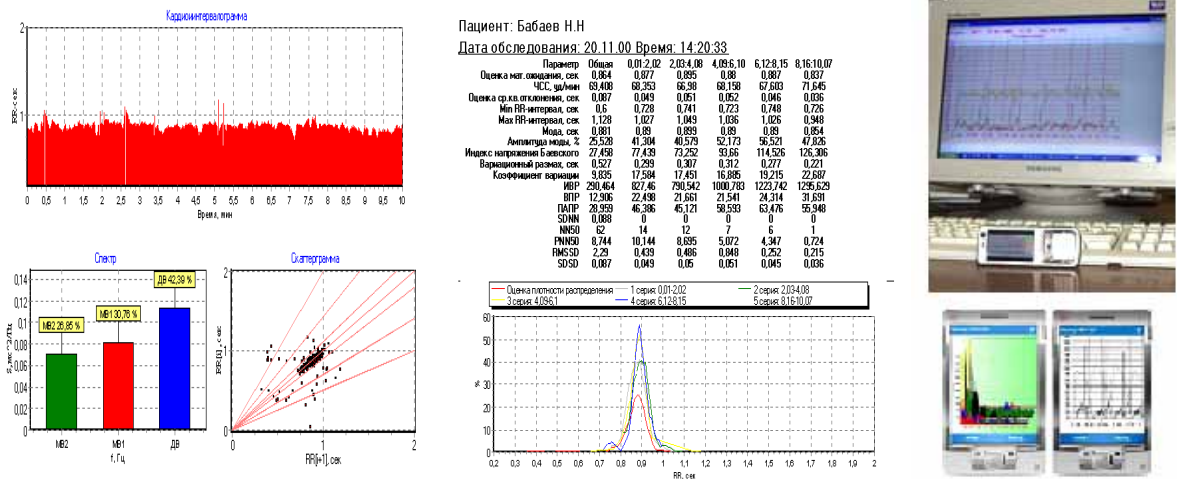


Рис. 2. Примеры отчетов ВСР-диагностики (слева и в центре); передача отчетов по сотовой связи (справа)

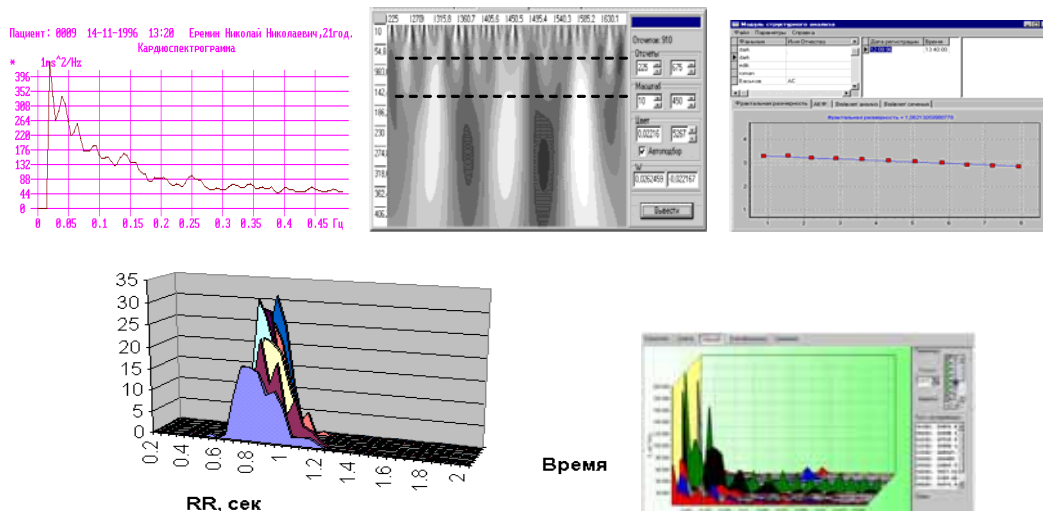


Рис. 3. КИГ, фурье- и вейвлет-спектр КИГ, определение ее фрактальной размерности (вверху); динамика гистограмм кардиоритма, динамика спектра кардиоритма (внизу)

ров гемодинамики: КИГ, ЭКГ, ПВ, ФКГ, контроль изменения артериального давления ($A_{\text{Д}}$) на основе измерения времени распространения пульсовой волны (ВРПВ). Определяются восемнадцать параметров по вариабельности сердечного ритма (ВСР-диагностики) [4], индекс напряжения (ИН) (стресс-индекс), индекс эффективности (ИЭ) коррекции функционального состояния организма [5], индекс сосудистого тонуса (ИСТ).

Отличием программного обеспечения АПК на базе МКМ-09 является обеспечение структурного анализа биопроцессов и биосигналов нелинейными методами теории самоорганизации. Структурная организация биопроцессов (кардиоритма) и биосигналов биосистем выявляется при их вейвлет-преобразованиях. Она наглядно отражается на вейвлет-диаграммах (рис. 4).

Скелетные функции (скелетоны) вейвлет-преобразования, как картина линий локальных экстремумов поверхностей, выявляют структуру анализируемого процесса. В ренормгрупповом подходе скейлинги скелетных функций показывают масштабную инвариантность или самоподобие. Оценкой структурной организации гомеостаза в ультраметрическом пространстве является 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-инва-

риантное 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 состояния здоровья, а фрактальная размерность деревьев Кейли вейвлет-диаграмм является количественной мерой структурной организации биосистем. Структурная организация биопроцессов (кардиоритма) и биосигналов биосистем выявляется при их вейвлет-преобразованиях.

При мониторинге сердечно-сосудистой системы также важно контролировать изменение артериального давления ($A_{\text{Д}}$). В последнее время все больший интерес проявляется к контролю состояния артериального и венозного сосудистого тонуса по скорости распространения пульсовой волны [6]. Линейная скорость кровотока по артериям в норме у здоровых лиц обычно не превышает 0,5 м/с, тогда как скорость распространения пульсовой волны по сосудам эластического типа составляет 5,0...7,0 м/с, по сосудам мышечного типа – 5,0...8,0 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. Особенно повышается скорость распространения пульсовой волны по эластическим сосудам с развитием атеросклероза и при наличии неадекватно леченной артериальной гипертонии [7–9]. Известно, что скорость распространения пульсовой волны коррелиру-

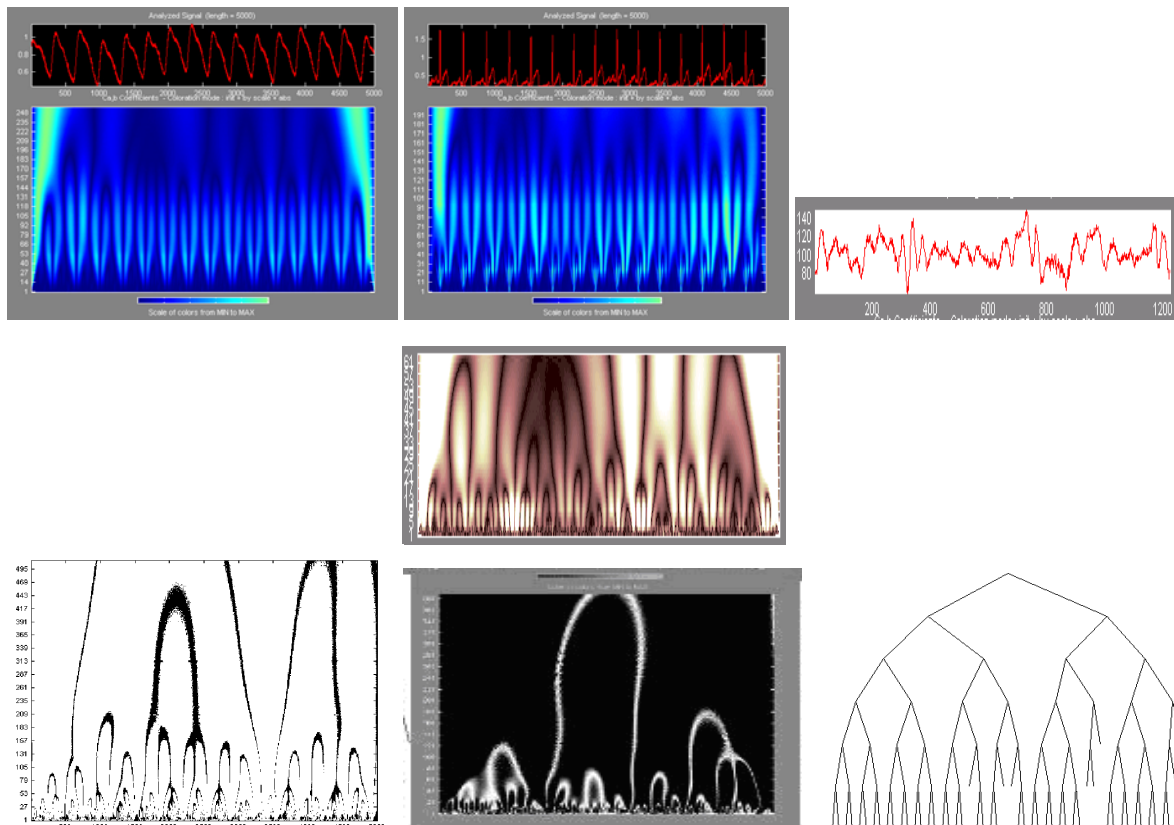


Рис. 4. ФКС, ЭКГ, ПВ их вейвлет-преобразование (вверху) и скелетоны (внизу)

ет с показателями смертности от любых причин, в том числе от сердечно-сосудистых заболеваний [10].

Совместный анализ ЭКС и ПВ позволяет оценить состояние сосудов эластического и мышечного типа по показателям скорости распространения пульсовой волны и модуля упругости.

Совместный анализ ЭКС и ПВ позволяет 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 и максимумом ПВ (рис. 5).

Временной отрезок между ними ΔT означает ВРПВ в систолической τ_c и диастолической τ_d фазе:

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

Для оценки состояния ФСО целесообразно объединить основные характеристики сосудистого тонуса в общий функционал в виде индекса сосудистого тонуса (ИСТ), величина которого, с одной стороны, зависит от ВРПВ, а с другой – отражает разность ВРПВ в систолической τ_c и диастолической τ_d фазе:

$$\text{ИСТ} = T_{\tau_c}^{\tau_d}.$$

Экспериментальные измерения задержки ВРПВ от изменения САД приведены в табл. 2 и на рис. 6. ВРПВ изменялось за счет изменения давления при нагрузке. В качестве нагрузки использовались 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 автоматическим монитором кровяного давления A&D Medical и ВРПВ, измеренным МКМ-09 (рис. 7).

Статистическая обработка данных (рис. 8) дает основания считать оценку ВРПВ достоверной ввиду ее близости к нормальному закону распределения.

Аппаратно-программные средства контроля ФСО разработаны для кардиолога, терапевта, валеолога, психолога, специалистов по функциональной диагностике и могут использоваться как в клинических, так и бытовых условиях. АПК на базе холтеровских кардиомониторов МКМ-09 имеет возможность дистанционной передачи информации о функциональном состоянии организма (ФСО) в диагностический центр. В отличие от существующих в стране и за рубежом аналогов, разработанный АПК позволяет извлекать дополнительную информацию из совместного анализа различных биосигналов и их производных, обладает достаточной универсальностью и доступностью для широкого применения в клинической практике, в амбулаторных и бытовых условиях.

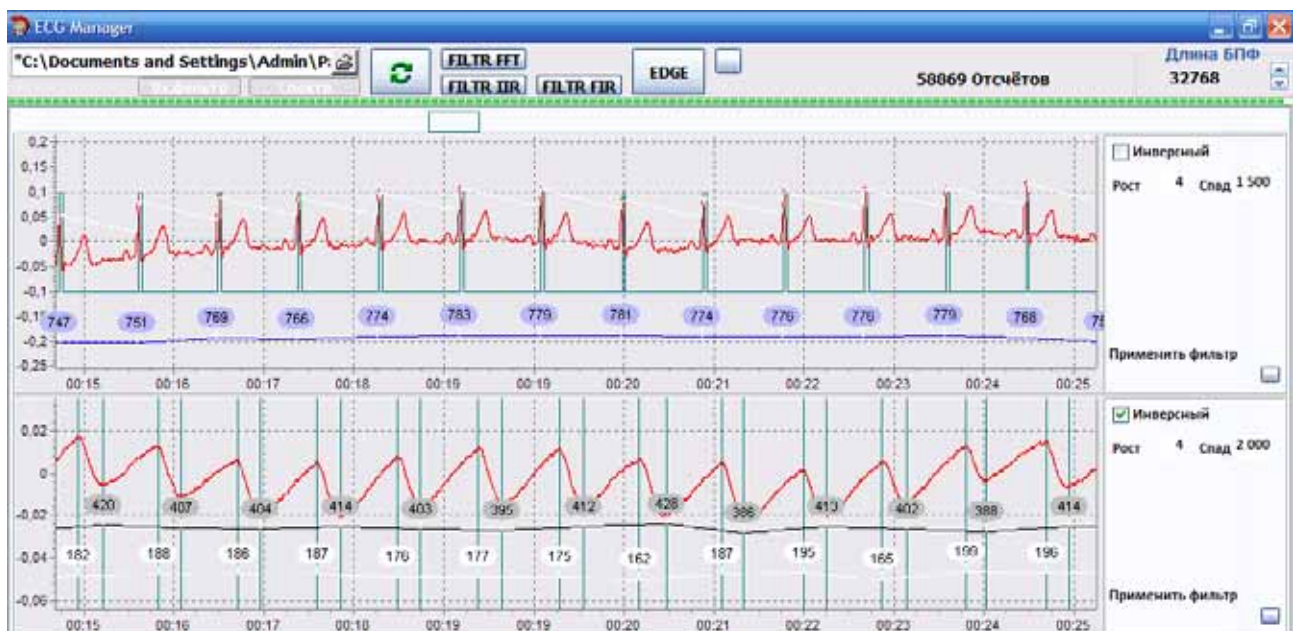


Рис. 5. Совместная запись сигналов ЭКГ и ПВ и измерение времени распространения пульсовой волны (ВРПВ) в фазе систолы (верхняя линия) и диастолы (нижняя линия)

Таблица 2

**Измерение ЧСС, ДАД, САД
на мониторе VPLab и ВРПВ на МКМ-09**

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

Библиографические ссылки

1. Национальные рекомендации ВНОК и ОССН по диагностике и лечению ХСН (третий пересмотр) [Электронный ресурс]. 2010. URL: <http://www.cardiosite.ru/articles/Article.aspx?articleid=10512&rubricid=13> (дата обращения: 15.12.2010).
2. The Task Force for the management of arterial hypertension of the European Society of Hypertension and of the European Society of Cardiology. 2007 Guidelines for the management of arterial hypertension // J. Hypertens. 2007. Vol. 25. P. 1105–1187.
3. Национальные рекомендации по диагностике и лечению артериальной гипертонии / ВНОК. Российское медицинское общество по артериальной гипертонии // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2008. № 7(6). Прил. 2.

4. Алдошин Г. М. Робастность в природе и технике. М.: Радио и связь, 2003.
5. Алдошин Г. М., Желудько С. П. Индекс эффективности коррекции функционального состояния организма // J. of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2009. № 3. С. 311–317.
6. Аппаратура для контроля среднего артериального давления : свидетельство на полез. модель РФ № 35064 U1 / В. А. Кац, В. А. Клочков, В. А. Дементьевский, О. Н. Шерстюкова. Опубл. 27.12.2003.
7. Исследование скорости распространения пульсовой волны и эндотелиальной функции у здоровых и пациентов с сердечно-сосудистой патологией / Ю. И. Гурфинкель, Н. В. Каце, Л. М. Парфенова и др. / Рос. кардиол. журн. 2009. № 2. С. 38–43.
8. Impact of aortic stiffness on survival in end-stage renal disease / J. Blacher, A. P. Guerin, B. Pannier // Circulation. 1999. 99. 2434-9.

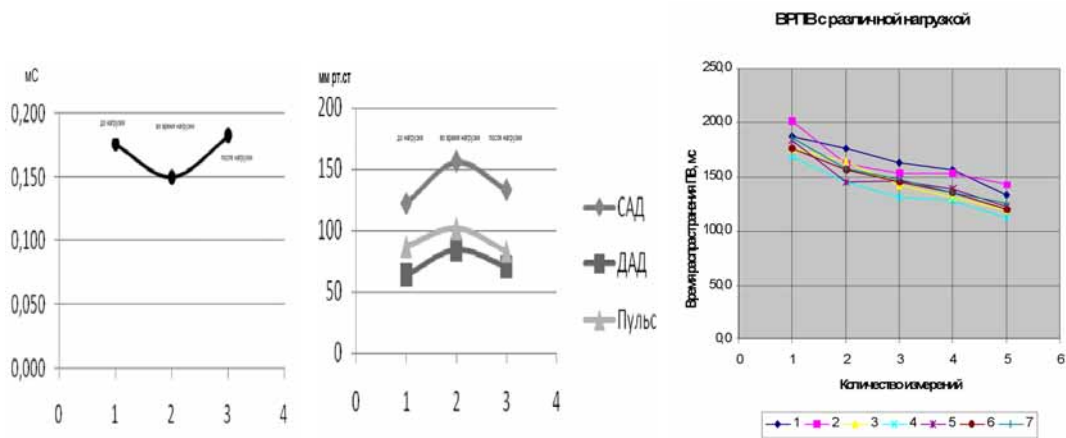


Рис. 6. Измерение ВРПВ рекордером МКМ-09 (слева); ЧСС, САД и ДАД на трех этапах на мониторе VPLab (в центре) ВРПВ семи пациентов на пяти этапах (справа): 1 – до нагрузки; 2 – после 5 приседаний; 3 – после 10; 4 – после 15; 5 – после 20 приседаний

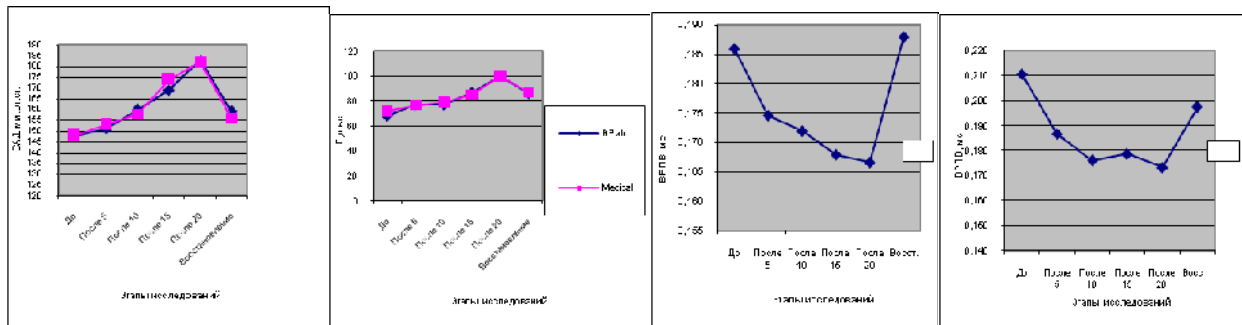


Рис. 7. Графики САД, ДАД, ЧСС монитором VPLab и автоматическим монитором давления A&D Medical (первый и второй слева) и ВРПВ с монитором МКМ-09 (первый и второй справа)

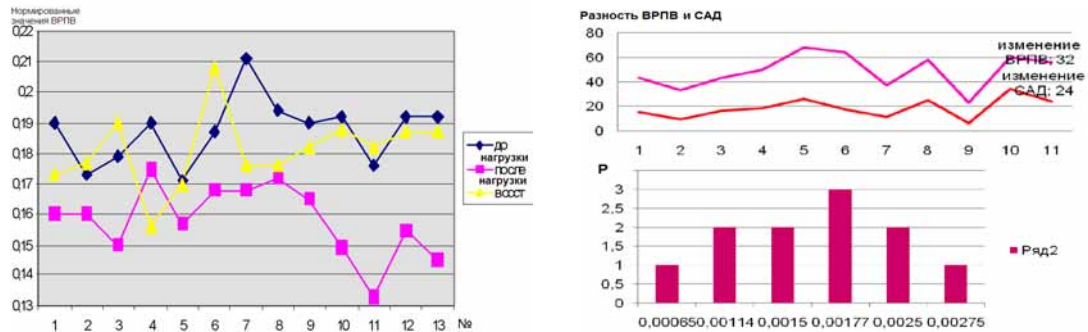


Рис. 8. Нормированные значения ВРПВ 14 пациентов (слева); статистическая оценка распределения разностей ВРПВ и САД (справа)

9. Недогада С. В., Чаляби Т. А. Сосудистая жесткость и скорость распространения пульсовой волны: новые факторы риска сердечно-сосудистых осложнений и мишени для фармакотерапии // Consilium-medicum. 2006. № 4. Т. 01. URL: http://old.consilium-medicum.com/media/bss/06_04/34.shtml (дата обращения: 15.12.2010).

10. London G., Guerin A. Influence of arterial pulse and reflective waves on systolic blood pressure and cardiac function // J. Hypert. 1999. Vol. 17 (Suppl. 2). P. 3–6.

G. M. Aldonin, A. M. Aleshechkin, S. P. Zheludko, I. I. Hamnagadaev, D. A. Kuzhel

HARDWARE AND SOFTWARE CONTROL OF CARDIOVASCULAR SYSTEM

In the laboratory, the Institute of Medical Instrument Engineering Physics and Radioelectronics Siberian Federal University (SFU) has developed hardware and software systems based on Holter heart monitor MKM-09 with remote transmission of information on the functional status of the organism in the diagnostic center, with sufficient flexibility and accessibility for a wide use in clinical practice, in outpatient and residential settings.

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

© Алдонин Г. М., Алешечкин А. М., Желудько С. П., Хамнагадаев И. И., Кузель Д. А., 2010

УДК 621.396.677.851

А. М. Александрин, Р. О. Рязанцев, Ю. П. Саломатов

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР ИЗ ИСКУССТВЕННОГО ДИЭЛЕКТРИКА В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ*

Рассмотрены способы построения квазиоптических структур – линз из неоднородного диэлектрика, проведен расчет неоднородного диэлектрика на основе тонких слоев переменных размеров и перфорированного однородного материала, приведены данные моделирования и экспериментов.

Ключевые слова: неоднородный диэлектрик, линза Люнеберга, линза Микаэляна.

Линзы из неоднородного диэлектрика известны давно. Однако изготовление таких линз наталкивается на технологические трудности и часто затраты на производство материалов с изменяющимися вдоль координат диэлектрическими параметрами слишком высоки. В некоторых случаях неоднородный диэлектрик можно представить в виде некоторой структуры из однородного диэлектрика, применяя специальные алгоритмы перфорации материала, как и некоторые другие способы.

Сферическая линза Люнеберга. В общем случае линза Люнеберга представляет собой диэлектрическую сферу, в которой коэффициент преломления n зависит от радиуса по следующему закону [1]:

$$n(r) = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad (1)$$

где R – радиус сферы; r – расстояние от центра линзы. Такая сфера преобразует сферический волновой фронт облучателя в плоский. Линза Люнеберга позволяет осуществлять сканирование в полном пространственном ди-

апазоне углов без искажения диаграммы направленности (ДН). Сканирование в сферической линзе обычно осуществляется переключением нескольких облучателей, расположенных на ее поверхности. Линза Люнеберга является идеальным устройством для широкоугольного неискаженного сканирования. Этим объясняется большой интерес, который проявляется к линзам данного типа.

Ранее были рассмотрены варианты создания искусственного диэлектрика и линз Люнеберга из материала с постоянной диэлектрической проницаемостью [2; 3]. Вид одной из моделей в разрезе приведен на рис. 1.

Модель состоит из множества слоев диэлектрика вдоль радиуса по вертикали, с изменением диаметра слоя вдоль радиуса линзы по горизонтали. Вертикальному и горизонтальному направлениям соответствуют направления осей y и z на рис 2. Вариация диаметра слоя диэлектрика имитирует изменение n вдоль радиуса линзы. Для исследований был использован материал с $\varepsilon = 1,6$. Возможно использование другого материала – в зависимости от ε материала будет изменяться положение фокуса линзы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».