

## **АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ БИОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СЕРДЕЧНОГО ПУЛЬСА ЧЕЛОВЕКА**

---

Смолянинов В.В., Кречетов С.П., Ольшанский В.М.\*  
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия,  
\*Институт эволюционной морфологии РАН, Москва, Россия

Проведены разработка и испытания многоканального аппаратно-программного комплекса, которые закладывают принципиальную экспериментально-теоретическую основу разработки новых комплексных методов многоточечного пульсометрического мониторинга артериальной системы человека.

Диагностика состояния сердечно-сосудистой системы (ССС) является задачей, которую не возможно решить на основе результатов какого-то одного вида обследования. На первый взгляд, сводящаяся к исследованию только периферического пульса, постановка диагноза в традиционной китайской медицине, в действительности сопровождается анализом врачом целого комплекса дополнительной визуальной, тактильной и другой сенсорной информации о состоянии пациента (характер дыхания, характер движений, состояние кожных покровов, тургор тканей и многое другое). Поэтому разработка аппаратно-программного комплекса для диагностики состояния ССС должна ориентироваться на регистрацию нескольких показателей, характеризующих исследуемую систему. Исходя из изложенного в перечень измеряемых показателей были включены электрокардиограмма, фонокардиограмма, спирограмма, а также несколько пульсограмм и термограмм с расположением датчиков по схеме, представленной на рисунке 1.

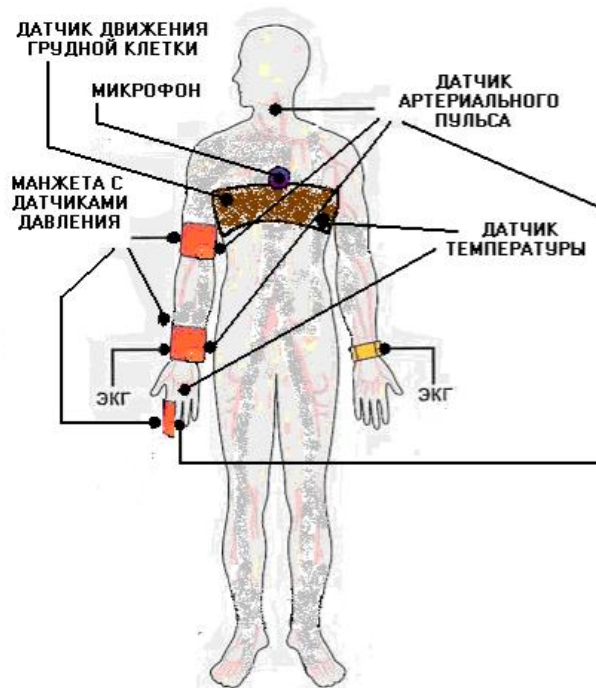


Рис. 1. Схема расположения датчиков для исследования распространения пульсовой волны по сосудам руки

Регистрация электрокардиограммы и фонокардиограммы предназначена в первую очередь для соотнесения сердечных биомеханических событий с биомеханическими проявлениями артериальной природы, регистрируемыми на руке. Однако они имеют и самостоятельное диагностическое значения для установления структурно-функциональных особенностей сердца пациента и, как следствие, способствуют правильной трактовке наблюдаемой пульсометрической картины. Для регистрации событий, имеющих место при движении крови по артериям и прохождении пульсовой волны в предложенной схеме, предполагается использование датчиков нескольких типов: регистрирующие кровенаполнение микроциркуляторного русла (подушечки пальцев, мочка уха); регистрирующие перемещение тканей над артериями (лучевой, сонной, височной), а также регистрирующие плетизмограмму по изменению в давлении в манжете, сдавливающей конечность в интересующей области. Назначение спирографии заключается в возможности получения дополнительной информации для учета в модели влияния дыхательных движений грудной клетки. Использование термометрии предполагает получение интегральной оценки изменений интенсивности кровотока в конечности при функциональных нагрузках по изменению ее температуры вследствие изменения поступления обладающей более высокой температурой артериальной крови.

Предлагаемый комплекс измерительных средств ориентирован на проведение исследований в разных режимах: в покое без функциональных нагрузок, при функциональных нагрузках, создаваемых внешними устройствами, и при функциональных нагрузках, создаваемых с участием пациента.

Проведенный анализ показал, что практически для всех выбранных в работе методов функционального исследования существуют выпускаемые промышленные образцы датчиков. Доступный промышленный вариант отсутствует лишь для датчика прохождения пульсовой волны по артерии. Имеющийся в распоряжении оптоволоконный датчик, разработанный в лаборатории «Исследования биомеханических систем» ИМАШ РАН для прибора «ПУЛЬС», имеет один очень существенный недостаток – длинные световоды, соединяющие механочувствительную головку с оптоэлектронным и аналогово-цифровым преобразователями (АЦП). Это ограничивает подвижность пациента при обследовании и делает практически невозможным одновременное использование нескольких пульсометрических датчиков. Поэтому, кроме создания специального АЦП для многоточечного мониторинга, была разработана конструкция специального датчика для регистрации механопульсограмм

на основе отражательного оптического сенсора CNY70. Указанная оптопара представляет собой смонтированные в одном компактном корпусе излучающий светодиод и регистрирующий фототранзистор, коллекторный ток которого зависит от расстояния до отражающей поверхности и ее состояния. Излучение светодиода имеет длину волны 950 нм и соответствует ближней инфракрасной области. Оно характеризуется высокой проникающей способностью в кожу и количество света, отраженное из кожи на фототранзистор зависит от кровенаполнения микрокапилляров. Поэтому оптический сенсор CNY70 использовалась так же в качестве датчика при регистрации пульса по кровенаполнению микрокапилляров подушечек пальцев и мочки уха.

Принципиальная схема регистрации пульсовой волны с использованием датчика на основе оптического сенсора CNY70 построена на передаче с помощью подвижного штока перемещений поверхности кожи над артерией, вызываемых пульсовой волной, упругой отражающей пластинке, фиксированной в корпусе датчика на определенном расстоянии от оптического сенсора. Электронная схема АЦП обеспечивает линейную зависимость между смещением пластинки и выходным оцифрованным сигналом.

Измерительный комплекс для исследования пульсовой волны реализован на базе популярного микропроцессора MSP430F149 производства Texas Instruments. В состав микропроцессора входит относительно быстрый 8-канальный 12 разрядный АЦП и 2 последовательных порта, допускающих работу в стандартах SPI и RS-232. К аналоговым входам процессора поступают сигналы от кардиографа (ЭКГ), оптосенсоров (ОС1-ОС4), датчиков температуры ДТ1-ДТ2.

Аналоговая часть электрокардиографа выполнена по стандартной схеме. Для того, чтобы фиксировать форму кардиограммы с минимальными искажениями аналоговая часть выполнена без проходных конденсаторов. Компенсация постоянных и низкочастотных помех осуществляется, во-первых за счет наличия обратной связи между входом инструментального усилителя и индиферентным электродом, закрепляемым на ноге, а, во-вторых, с помощью ЦАПов, которые под управлением процессора выставляют компенсирующее смещение на одном из входов дифференциального усилителя. Датчики для измерения пульса, сенсоры CNY70, производства фирмы Vishay, соединены через буферные усилители и активные фильтры низких частот с входами АЦП процессора. Для регистрации температуры использованы термосенсоры TMP36 фирмы Analog Device, имеющие внутренние усилители и стабилизаторы напряжения. Эти термосенсоры могут подключаться ко входам АЦП напрямую.

Используемый интегрированный датчик давления MPX5050 производства Motorola также содержит внутри электронные компоненты, обеспечивающие усиление и стабилизацию сигнала. Для его подключения применено 16-разрядное сигма-дельта АЦП AD7705 фирмы Analog Device. АЦП этого типа обеспечивает эффективную фильтрацию высокочастотных и синфазных помех, а также помех промышленной частоты.

Комплекс допускает как автономную работу с сохранением данных измерений в флэш-памяти, так и режим непосредственной связи с компьютером в стандарте последовательного порта RS-232. Согласование уровней достигается со помощью микросхемы ADM202. Микросхема CP2101 обеспечивает преобразование RS232 в USB, что облегчает сопряжение с современными компьютерами, в первую очередь портативными, многие из которых уже не имеют разъемов RS-232. В качестве микросхемы флэш-памяти, обеспечивающей сохранение данных в автономном режиме измерений, использованы микросхемы AT45DB642 объемом 8 Мбайт.

Оцифровка параметров производится 500 раз в секунду. В режиме прямой связи с компьютером все данные посылаются посылками в реальном времени. Длина посылки 11 байт: заголовок 2 байта, 8 параметров по 2 байта, концевик – один байт. Скорость передачи информации 115200 бод.

В автономном режиме результаты измерений сначала накапливаются в буфере объемом 512 байт, а потом переписываются в флэш-память.. Объем буфера связан с организацией памяти в виде страниц объемом 512 байт. Запись во флэш осуществляется 2 раза в секунду.

Программа для компьютера, управляющая аппаратной частью, написана на Delphi под Windows. Она обеспечивает прием посылок, управление режимом считывания результатов из флэш-памяти, отображает результаты измерений и обеспечивает их сохранение в виде текстовых табличных файлов, легко экспортируемых в MS-Excel, MatLab или другие распространенные программы.

Решение задачи распознавания состояний любой системы организма предполагает сведение ее описания к набору параметров и установление взаимосвязи между их значениями и выделяемыми различными состояниями данной системы или организма в целом. Использование для оценки состояния сердечно-сосудистой системы (ССС) продолжительных регистраций в виде электрокардиограмм, фонокардиограмм, плетизмограмм, пульсограмм и других, приводит к появлению многоточечных числовых массивов. Такие массивы нуждаются в дополнительной обработке, позволяющей преобразовать их к массивам, существенно меньшим по объему, но сохраняющим возможность воспроизведения регистрируемых функций и расчета параметров этих функций для решения задачи распознавания состояний.

Эффективным способом ухода от массивов большого объема  $\{X_{ki}, t_{ki}\}$  или  $\{X_{pki}, t_{pki}\}$ , представляющих собой результаты измерений показателя  $X(t)$  является параметризация регистрируемых функций с использованием преобразований, основанных на разложении этих функций в ряд по ортогональным функциям. Под параметризацией функции в данном случае понимается представление её набором параметров, являющихся коэффициентами разложения по ортонормированным функциям, что позволяет с заданной точностью реконструировать исходную функцию, используя этот набор коэффициентов. Размер массива коэффициентов разложения как минимум на порядок меньше размера массива первичных данных, представляющих оцифрованные результаты измерений, что обеспечивает решение задачи уменьшения объема хранимой информации.

Однако последнее не является единственной причиной привлекательности использования параметризации коэффициентами разложения в ряд по ортонормированным функциям. Обсуждаемое преобразование позволяет создавать образ объекта в параметрическом пространстве коэффициентов разложения и решать задачи классификации и распознавания состояний объекта. Очевидно, что в силу периодичности измеряемых показателей ССС параметризацию целесообразно выполнять разбив соответствующую функцию на куски в соответствии с сердечным циклом. Тогда результаты измерений показателя ССС преобразуются в результаты измерений многомерной случайной величины, которые могут быть подвергнуты соответствующей статистической обработке. В частности появляется возможность параметрического усреднения вида функции на интервале длиной в период, выбраковки искаженных циклов и оценки вариативности сердечного цикла по изменению длины и направления соответствующего многомерного радиус-вектора. Таким образом, параметризация показателей ССС организма с использованием разложения в ряд по ортонормированным функциям не только является способом уменьшения объема хранимой информации по результатам измерений, но и предоставляет возможность дополнительного анализа особенностей регистрируемого сигнала.

Параметризация сигнала может проводиться с использованием преобразования Фурье, вейвлет-преобразования и преобразования Чебышева. Необходимость использования преобразований разного типа обусловлена существенными различиями форм сигналов, получаемых не только от разных видов датчиков, но и даже механопульсограмм, регистрируемых в разных условиях. В ходе исследований предполагалось выбрать наиболее подходящие преобразования для регистрируемых сигналов. Использование ряда длиной более 20 членов не сопровождается заметным улучшением совпадения исходной функции и обратного преобразования ее разложения. Это выражается в практически неизменной длине радиус-вектора периода пульсограммы в параметрическом пространстве при повышении указанной размерности.

Полученные результаты пока не позволяют отдать предпочтение какому-то одному из перечисленных выше способов параметризации (преобразований) при решении задачи разграничения исследованных сигналов в соответствующих параметрических пространствах. Это указывает на необходимость расширения количества анализируемых типовых сигналов, в первую очередь за счет проведения регистраций механопульсограмм у пациентов с отклонениями в состоянии ССС. В таком случае будет выбран не только наиболее эффективный способ параметризации, но и проведена статистическая классификация для расчета вероятности того или иного диагноза.

На основе всего массива коэффициентов разложения по ортогональным функциям рассчитывается усредненный набор коэффициентов, по которому проводится объединенная реконструкция пульсограммы и ЭКГ, соответствующая одному сердечному циклу, с автоматической расстановкой реперов для определения временных и амплитудных параметров, используемых в функциональной диагностике при инструментальном исследовании ССС. На основе измеренных амплитудно-временных характеристик характер, рассчитываются интересующие показатели функционирования сердечно-сосудистой системы.

Одновременная запись пульсограммы и ЭКГ предполагает возможность проведения такого анализа по двум типам регистраций и это также заложено в основу алгоритма. Другой особенностью разработанного алгоритма является наличие в нем анализа вариативности формы регистрируемых циклов пульсовых волн и электрокардиограмм по их параметрическому образу, получаемому при поцикловом разложении по ортогональным функциям. Одновременная запись пульсограммы и ЭКГ предполагает возможность анализа взаимосвязи параметров сердечного цикла, измеряемых по различным регистрациям. В разрабатывавшемся программном обеспечении для этого предполагается использовать смешанные скатерограммы продолжительности сердечного цикла без сдвига и со сдвигом.

Отличительной особенностью разрабатываемого программно-аппаратного комплекса для биомеханических исследований сердечного пульса человека является одновременная регистрация нескольких механопульсограмм, что позволяет сопоставить результаты исследований в разных точках артериальной системы. Однако подобное сопоставление требует построения математическую модель всего артериального дерева человека. Не завершенность указанной математической модели в сочетании с потребовавшимися большими временными затратами на ее разработку не позволили приступить к созданию алгоритмов и программного обеспечения для реализации основной отличительной особенности аппаратной части разрабатывавшегося комплекса многоканальной регистрации механопульсограмм. В тоже время проведенные исследования и испытания принципиально новой измерительной системы, показывают ее эффективность для решение главной задачи - повышения диагностической информативности регистрируемых форм механопульсограмм и разработки теоретических основы пульсовой диагностики. Они закладывают принципиальную экспериментально теоретическую основу разработки новых комплексных методов многоточечного пульсометрического мониторинга артериальной системы человека.