

Современные средства мониторингирования пульсовой волны

¹ Центр медицинского, экологического приборостроения и биотехнологий Санкт-Петербургского Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики

² Конструкторское бюро современных технологий Санкт-Петербургского государственного университета ИТМО
e-mail: k.v.tarakanov@gmail.com

Реферат

Цель работы — предоставить обзорную информацию о современных устройствах, предназначенных для неинвазивного измерения параметров сердечно-сосудистой системы на основе датчиков пульсовой волны. В работе рассмотрены приборы, классифицированные по принципу измерения, их достоинства и недостатки. Обращено внимание на возможность применения приборов для длительного мониторингирования, также предложена собственная разработка авторов для решения этой задачи.

Ключевые слова: датчики пульсовой волны, неинвазивные измерения, параметры сердечно-сосудистой системы, длительный мониторинг.

Введение

Ввиду отчетливо наблюдаемого роста сердечно-сосудистых заболеваний и ограниченных терапевтических возможностей на поздних стадиях лечения медицинские специалисты стремятся осуществлять раннюю диагностику таких заболеваний. Традиционно первичный анализ состояния сердечно-сосудистой системы выполняется с использованием таких методов, как электрокардиограмма и эхокардиограмма. Но данные методы эффективны в большей степени для оценки состояния сердца и не предоставляют достаточную информацию о сосудах.

В то же время существует прямая зависимость между сердечно-сосудистыми заболеваниями и состоянием артерий, их эластичностью. Так, анализ пульсовых волн, возникающих в артериальных сосудах и последовательно распространяющихся при ритмическом выбрасывании крови сердцем и определяемых артериальной растяжимостью и жесткостью, является неотъемлемой составляющей диагностирования и лечения повышенного кровяного давления.

Исследование пульсовой волны предоставляет точную и объективную информацию об изменениях параметров кровообращения при воздействии на организм различных физических факторов, что позволяет использовать ее в различных областях медицины, например, в физиотерапии.

Целесообразным с точки зрения достоверности результатов является проведение обследования пациента в течение длительного времени, так как только длительный непрерывный мониторинг дает возможность выявить нарушения, которые проявляются редко, бессимптомно или периодически.

В то же время для длительной эксплуатации устройство, обеспечивающее регистрацию пульсовых волн, должно быть максимально компактным и удобным для ношения.

Цель нашего исследования — рассмотреть современные (выпускаемые или разрабатываемые) устройства на основе датчиков пульсовой волны, использующиеся для определения параметров сердечно-сосудистой системы, и провести сравнительный анализ этих устройств и авторской разработки.

Материал и методы исследования

Метод, основанный на анализе пульсовой волны, заключается в регистрации датчиками пульсовой волны с последующим графическим представлением, так называемой сфигмограммой, механических пульсовых колебаний стенки кровеносного сосуда. Применение одного датчика пульсовой волны позволяет определить форму, амплитуду и длительность пульсовой волны. В купе с датчиком электрокардиограммы либо при задействовании двух датчиков пульсовой волны можно рассчитать скорость пульсовой волны, которая коррелирует с систолическим кровяным давлением при определенных физиологических условиях [5].

В настоящее время на рынке мониторингирования физиологических параметров человека насчитываются десятки датчиков, регистрирующих пульсовую волну, каждый из которых имеет свои собственные принципы измерения (осциллометрический, тензометрический, оптический, электромагнитный) достоинства и недостатки.

Одним из первых способов неинвазивного определения артериального давления считается осциллометрический способ. Сегодня можно встретить приборы на основе такого метода, например, у компании IEM GmbH [7].

Предлагаемое устройство (рис. 1) предназначено для суточного мониторингирования в амбулаторных условиях. В час производится до тридцати измерений путем автоматического нагнетания воздуха в окклюзионную манжету, которая, подобно обычному тоно-

ОБЗОР

метру, крепится на плече. Возможна передача данных на компьютер через инфракрасный интерфейс или посредством технологии Bluetooth. Результатом исследования формы пульсовой волны является вывод на экран монитора персонального компьютера данных измерений: аугментационный индекс, индекс отраженной волны, скорость пульсовой волны, систолическое, среднее и диастолическое давление, минутный сердечный выброс, общее периферическое сопротивление сосудов и др. Минусами рассмотренного устройства является его громоздкость, а также то, что нагнетание и стравливание воздуха в манжете даже с учетом допустимой частоты повторения сопряжены с неприятными и отвлекающими ощущениями.



Рис. 1. Устройство осциллометрического типа (источник — <https://www.promed.ie/shop/catalog/product.aspx?categoryid=3560&serverid=medical>)



Рис. 2. Тензометрический датчик (источник — <http://www.white-medical.co.uk/HealthSTATS-BPro-with-BProSoft>)

Интересной с точки зрения дизайна является система суточного мониторинга артериального давления и пульсовой волны, разрабатываемая компанией *Healthstats* [6]. Легкое и компактное, устройство выполнено в виде наручных часов (рис. 2).

В основе работы системы лежит технология модифицированной аппланационной тонометрии, предполагающая частичное сдавливание поверхностно залегающих артерий конечности и регистрацию с помощью тензодатчиков давления, передаваемого на них через стенку сосуда. При этом тензодатчик размещается на запястье в проекции лучевой артерии, не затрудняя венозный отток. Перед применением требуется осциллометрическая калибровка по параметрам обследуемого.

В прибор производится запись следующих величин: частота сердечных сокращений; среднее артериальное давление; пульсовое давление, определяемое разностью между систолическим и диастолическим давлением. Программное обеспечение на компьютере выводит график формы пульсовой волны с вычислением аугментационного индекса, коррелирующего со скоростью пульсовой волны.

Отсутствие компрессора для нагнетания воздуха и манжеты и миниатюрность характеризуют устройство как весьма перспективное для длительного использования. В то же время по-прежнему в таком методе присутствует сдавливающее воздействие, что в купе с необходимостью обязательного сохранения точного положения тензодатчика относительно артерии накладывает существенные ограничения как по удобству ношения, так и по условиям эксплуатации. Малейшие смещения устройства неминуемо приводят к изменению измеряемого сигнала, а подвижность человека, в частности, кисти руки, существенно ограничена.

В свою очередь, компания *Binar* выпускает на рынок ряд датчиков пульсовой волны оптического (фотоплетизмографического) типа (рис. 3) [1, 3]. Принцип работы оптических датчиков состоит в следующем. Источник излучения (в данном случае светодиод) создает пучок инфракрасных волн с длиной волны, соответствующей спектральным зонам поглощения гемоглобина крови. А фотоэлектрический преобразователь (фотодиод) фиксирует интенсивность отраженного от исследуемого участка ткани или прошедшего через него рассеянного излучения, которая пропорциональна изменению объема крови.

Выпускаемый *Binar* прибор выполнен в виде клипсы и предусматривает размещение на мочке уха. Для постоянного мониторинга требуется подключение к компьютеру, которое обеспечивается встроенным в сенсор беспроводным интерфейсом Bluetooth, позволяющим пользователю удалиться от компьютера на расстояние до 15 метров. Также предусмотрено программное обеспечение для смартфонов и сотовых телефонов.

Для линейки фотоплетизмографических датчиков пульсовой волны характерны простота исполнения и компактность. К сожалению, изменение интенсивности окружающего солнечного или искусственного света негативно сказывается на достоверности изме-



Рис. 3. Беспроводной датчик фотоплетизмографического типа (источник — http://www.heartsensor.info/we08/brochure_hrs08.pdf)



Рис. 4. Линейка сенсоров фотоплетизмографического типа (источник — <http://www.masimo.com/sensors/LNOP-reusable.htm>)



Рис. 5. Разрабатываемый электромагнитный датчик (источник — <http://www.nanopulse.ru/articles.php?catvar=9&artvar=30>)

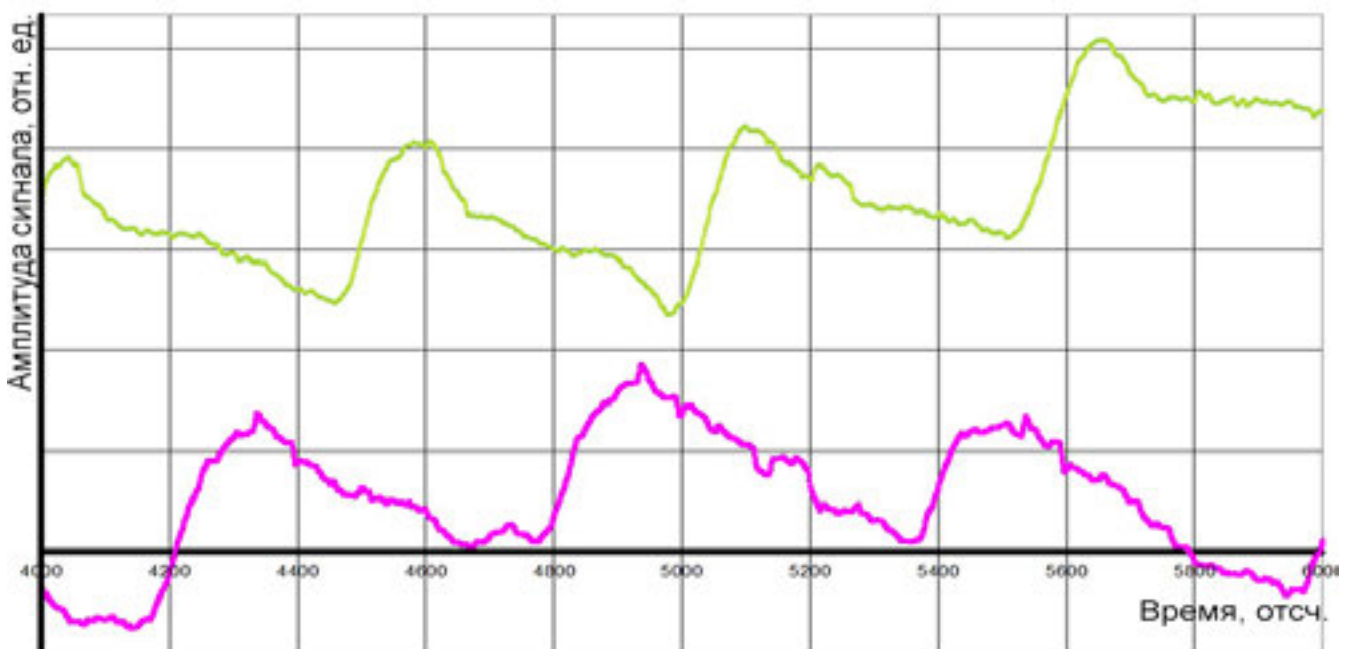


Рис. 6. Сфигмограмма по двум взаимно перпендикулярным направлениям измерения

рений. Вдобавок давление на мочку уха, вызванное креплением зажима, доставляет неудобство и в некоторых случаях раздражение.

Известны сенсоры с возможностью размещения, помимо мочки уха, на пальце или на лбу. Так, компания *Masimo* [4] предлагает широкий спектр сенсоров (рис. 4): одноразовые клейкие на безымянный или средний палец, либо многократного использования с возможностью крепления на лоб. Такие датчики обеспечивают меньшее сдавливающее воздействие, но также реагируют на изменения интенсивности окружающего освещения, к тому же необходимо корректировать расположение клейких сенсоров каждые 8 часов и переставлять сенсоры многократ-

ного использования каждые 4 часа. Принцип работы электромагнитного датчика можно проиллюстрировать на примере одной из разработок российской компании «Нанопульс» [2] на базе сверхширокополосных технологий (рис. 5).

Разрабатываемый в настоящее время измеритель скорости пульсовой волны состоит из двух сенсоров и соединяющего их сигнального кабеля. Работа каждого из сенсоров основана на получении графиков зависимости формы пульсовой волны от времени на диагностируемых участках тела путем регистрации воздействия пульсовой волны на слабую зондирующую сверхвысокочастотную электромагнитную волну, излучаемую и принимаемую датчиками. Пре-

имуществом такого подхода является возможность измерения прикладыванием сенсора только к одной стороне тела пациента, что значительно расширяет выбор места их расположения. Следует отметить, что на данном этапе разработки устройства результаты измерений сильно подвержены влиянию артефактов, возникающих при движении человека. Для преодоления недостатков существующих разработок, представленных выше, нами был разработан и в настоящее время исследуется макет датчика пульсовой волны на основе регистрации электрических характеристик ткани. Он изначально предназначен для длительного ношения (недели, месяцы) и представляет собой небольшой браслет со встроенными в него электронной платой и специальными электродами, фиксируемый на запястье при помощи эластичного бинта. Принцип действия датчика основан на измерении электрических передаточных функций ткани руки между электродами датчика на разных частотах, при этом фиксируется два направления: вдоль сосудов и поперек.

Разработанный макет позволяет детектировать форму, амплитуду и длительность пульсовых волн, а за счет измерения в двух направлениях дает возможность компенсировать большинство шумов регистрируемой сфигмограммы (рис. 6). Перед нами

стоит задача уменьшения размеров устройства и разработки надежного крепления на запястье.

Выводы

Анализ пульсовой волны при помощи относительно простых датчиков, несомненно, является хорошей альтернативой распространенным на сегодняшний день методам магниторезонансной томографии и доплерографии, осуществляемым посредством использования громоздких и дорогостоящих приборов.

Одним из приоритетных направлений современной медицины в сфере диагностики сердечно-сосудистых заболеваний является обеспечение возможности длительного мониторингирования человека. Его можно организовать при помощи датчиков, измеряющих физиологические параметры человека в течение длительного времени. Такие датчики должны быть неинвазивными, высокоточными, эргономичными, относительно дешевыми и не требующими больших трудозатрат, с эффективными механизмами подавления внешних помех (при движении, при изменении освещенности и т. п.).

В настоящее время мы работаем над новым датчиком на основе регистрации электрических характеристик ткани, который позволит устранить рассмотренные недостатки существующих датчиков пульсовой волны.

Литература

1. Дорофеев А. А., Десова А. А., Гучук В. В. и др. Измерение, преобразование и обработка пульсового сигнала лучевой артерии в задачах медицинской диагностики // *Мир измерений*. 2009. № 1. С. 4–10.
2. Зиганшин Э. Г., Черненко А. И. Способ неинвазивной пульсовой диагностики сердечной деятельности пациента и измерения скорости пульсовой волны и устройство для реализации этого способа: пат. № 2393759 РФ, МПК А61В5/02; опубл. 10.07.2010. Бюл. № 19. 16 с.
3. Тылюдина Е. В., Юран С. И., Або Исса Н. Фотоплетизмография и анализ пульсовых кривых // *Инновационно-мультиязычные АПК и аграрному образованию — научное обеспечение: Материалы Всеросс. науч.-практ. конф.* 14–17 февр. 2012. Т. 3. Ижевск: Ижев. ГСХА, 2012. С. 336–342.
4. Goldman J. M., Petterson M. T., Kopotic R. J. et al.

Masimo Signal Extraction Pulse Oximetry // Journal of Clinical Monitoring and Computing. 2000. Vol. 16. P. 475–483

5. Lass J., Meigasa K., Kattaia R. et al. Optical and electrical methods for pulse wave transit time measurement and its correlation with arterial blood pressure // *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering*. 2004. Vol. 10. P. 123–136.

6. Nair D., Tan S-Y., Gan H-W. et al. The use of ambulatory tonometric radial arterial wave capture to measure ambulatory blood pressure: the validation of a novel wrist-bound device in adults // *Journal of Human Hypertension*. 2008. Vol. 22. P. 220–222. doi:10.1038/sj.jhh.1002306.

7. Westhoff T. H., Straub-Hohenbleicher H., Schmidt S. et al. Convenience of ambulatory blood pressure monitoring: comparison of different devices // *Blood Pressure Monitoring*. 2005. Vol. 10. P. 239–242.

UDK 616.134.2-07:621.385.2

Tarakanov S. A. ¹, Podolskiy M. D. ²

Modern ways of pulsewave monitoring

¹ *Center of medical, ecological instrumentation and biotechnologies of National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, PhD Technical*

² *Limited liability company «Design office of modern technologies of the St. Petersburg State University ITMO»*

e-mail: k.v.tarakanov@gmail.com

Abstract

The aim of the offered article is to review the state-of-the-art devices for noninvasive measurement of the cardiovascular parameters, based on the pulse wave sensors. The article describes the advantages and disadvantages of the sensors, classified according to their principle of measurement. Attention is drawn to the possibility of applying devices for longtime monitoring, also offered development of authors for this purpose.

Keywords: pulse wave sensors, noninvasive measurements, cardiovascular parameters, longtime monitoring.

References

1. Dorofejuk A. A., Desova A. A., Guchuk V.V. et al. *Izmerenie, preobrazovanie i obrabotka pul'sovogo signala luchevoj arterii v zadachah medicinskoj diagnostiki* // *Mir izmerenij*. 2009. No 1. p. 4–10. [Measurement, transformation and processing of a pulse signal of radial artery in problems of medical diagnostics]. [In Russian].
2. Ziganshin Je.G., Chernenko A.I. *Sposob neinvazivnoj pul'sovoj diagnostiki serdechnoj dejatel'nosti pacienta i izmerenija skorosti pul'sovoj volny i ustrojstvo dlja realizacii jetogo sposoba: pat. No 2393759 RF, MPK A61B5/02; opubl. 10.07.2010. Bjul. No 19. 16 p.* [Way of noninvasive pulse diagnostics of patient's cardiac activity of the measurement of pulse wave velocity and device for realization of this way of diagnostics]. [In Russian].
3. Tyljudina E.V., Juran S. I., Abo Issa N. *Fotopletizmografiya i analiz pul'sovyh krivyh* // *Innovacionnomu razvitiju APK i agrarnomu obrazovaniju — nauchnoe obespechenie: Materialy Vseross. nauch.-prakt. konf. 14–17 fevr. 2012. T. 3. Izhevsk: Izhev. GSHA, 2012. S. P. 336–342.* [Photoplethysmography and pulse curves analysis]. [In Russian].
4. Goldman J. M., Petterson M. T., Kopotic R. J. et al. *Masimo Signal Extraction Pulse Oximetry* // *Journal of Clinical Monitoring and Computing*. 2000. Vol. 16. P. 475–483.
5. Lass J., Meigasa K., Kattaia R. et al. *Optical and electrical methods for pulse wave transit time measurement and its correlation with arterial blood pressure* // *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Engineering*. 2004. Vol. 10. P. 123–136.
6. Nair D., Tan S-Y., Gan H-W. et al. *The use of ambulatory tonometric radial arterial wave capture to measure ambulatory blood pressure: the validation of a novel wrist-bound device in adults* // *Journal of Human Hypertension*. 2008. Vol. 22. P. 220–222. doi:10. 1038/sj. jhh. 1002306.
7. Westhoff T. H., Straub-Hohenbleicher H., Schmidt S. et al. *Convenience of ambulatory blood pressure monitoring: comparison of different devices* // *Blood Pressure Monitoring*. 2005. Vol. 10. P. 239–242.