

В.Е. Анциперов, А.С. Бугаев, М.В. Данилычев, Г.К. Мансуров

ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ С СИНХРОННЫМ КАНАЛОМ ЭКГ*

Рассматривается новый метод диагностики атеросклероза с помощью ранее разработанного авторами пневматического датчика артериального давления. Поскольку атеросклероз – прогрессирующее заболевание, характеризующееся отложением холестерина и определенных фракций липопротеинов на стенках кровеносных сосудов, оно всегда сопровождается увеличением жесткости стенок артерий. Одним из методов оценки артериальной жесткости является измерение скорости артериальной пульсовой волны, то есть расстояния, пройденного волной, деленного на время, необходимое для прохождения этого расстояния. Таким образом, прямой метод оценки скорости пульсовой волны состоит в измерении времени прохождения пульсовой волны между парой точек артерии с помощью, например, любых тонометрических датчиков. В связи с этим в статье обсуждается возможность использования нового типа датчиков для измерения времени прохождения пульсовой волны. Однако, учитывая существующие особенности этих датчиков и, соответственно, особенности измерения давления, потребовалось существенно изменить прямой метод оценки скорости пульсовой волны. Основная модификация, характеризующая новый косвенный метод, состоит в оценке задержки пульсовой волны в точках артерии относительно некоторого характерного момента синхронной ЭКГ.

Ключевые слова: артериальное давление, неинвазивные методы измерения, пневматический датчик, скорость распространения пульсовой волны, ЭКГ, диагностика атеросклероза.

V.E. Antsiperov, A.S. Bugaev, M.V. Danilychev, G.K. Mansurov

ESTIMATION OF THE PULSE WAVE PROPAGATION VELOCITY OF BLOOD PRESSURE BY A PNEUMATIC SENSOR WITH A SYNCHRONOUS ECG CHANNEL

The paper discusses a new method for diagnosing atherosclerosis using a pneumatic blood pressure sensor previously developed by the authors. Since atherosclerosis is a progressive disease characterized by the deposition of cholesterol and certain lipoprotein fractions on the walls of blood vessels, it is always accompanied by an increase in the stiffness of the arterial walls. One method for assessing arterial stiffness is to measure the velocity of the arterial pulse wave, that is, the distance traveled by the wave divided by the time it takes to travel that distance. Thus, a direct method for assessing the speed of the pulse wave consists in measuring the transit time of the pulse wave between a pair of points of the artery using, for example, any tonometric sensors. In this regard, the article discusses the possibility of using a new type of sensors to measure the transit time of a pulse wave. However, considering the existing features of these sensors and, accordingly, the features of pressure measurement, it was necessary to significantly change the direct method for assessing the pulse wave velocity. The main modification characterizing the new indirect method consists in assessing the delay of the pulse wave at the points of the artery relative to a certain characteristic moment of the synchronous ECG.

Keywords: blood pressure, non-invasive measurement methods, pneumatic sensor, pulse wave velocity, ECG, diagnostics of atherosclerosis.

Введение

Важнейшими факторами в лечении атеросклероза являются профилактика и ранняя диагностика. В субклинической (до появления ясных клинических признаков) стадии атеросклероз представляет собой процесс постепенной, внешне малозаметной утраты кровеносными сосудами своих основных функций. Стенки сосудов постепенно обызвествляются и теряют свою эластичность, прогрессирует сужение диаметра сосуда. Процесс характеризуется повышением жесткости артериальных стенок и увеличением артериального давления (АД). В современной практике популярным количественным методом оценки артериальной жесткости стало измерение скорости распространения пульсовой волны (СРПВ), т. е. скорости распространяющейся по артериям волны повышенного давления, вызванной выбросом крови из левого желудочка сердца в период систолы. В приближении линейной теории для этой величины можно записать [1]:

$$V \approx \sqrt{(Eh)/(\rho D)}, \quad (1)$$

где E – эффективный касательный модуль Юнга; h и D – невозмущенные толщина стенок и диаметр сосуда соответственно; ρ – плотность крови.

Из формулы (1) следует, что рост величины модуля упругости и уменьшение диаметра сосуда приводят к повышению величины СРПВ. Естественным методом измерения СРПВ можно считать непосредственное измерение величины запаздывания волны (PWTT – pulse wave transit time) между парой заданных поперечных сечений исследуемой артерии. Теоретически для этого надо использовать пару сфигмометрических датчиков, расположенных проксимально над поверхностными сосудами (артериями) и дистально по отношению к сердцу (на сонной, бедренной, лучевой и других доступных артериях). Если знать расстояние d между датчиками (вдоль артерии) и определить время запаздывания волны между ними как $\Delta t = t_2 - t_1$, то величину СРПВ можно очевидным образом представить в виде отношения этих величин:

$$V = d / \Delta t = d / (t_2 - t_1), \quad (2)$$

где t_2 и t_1 – моменты времени последовательного прохождения некоторого выбранного маркера пульсовой волны, например, ее фронта, для каждого из датчиков.

Реализация метода

Однако при реализации метода на практике возникает целый ряд трудностей технического и методического характера.

В предшествующие годы авторами доклада разрабатывались и экспериментально тестировались датчики нового типа для регистрации динамики пульсовой волны АД, в том числе трехканальный пневматический датчик непрерывного неинвазивного мониторинга АД [2–5]. Очевидным преимуществом разработанного прибора признана возможность режима непрерывного измерения динамики АД, который позволяет не только определять текущие систолическое/диастолическое давления, но и отслеживать динамику АД как внутри цикла, так и на значительных интервалах времени. Для решения проблемы оценивания СРПВ с помощью пневматических датчиков был применен нестандартный подход. Его идея заключалась в том, что если удастся разнести измерения для пары точек

над артерией еще и по времени, то можно попробовать обойтись только одним датчиком. Было показано, что в качестве опорного периодического «нуля» можно использовать положение R-зубца на ЭКГ [5]. Для этого в разработанный авторами пневматический датчик АД был интегрирован дополнительный канал синхронного измерения электрокардиографического (ЭКГ) сигнала (рис. 1). В данном случае этот канал, говоря языком радиотехники, выступил в качестве своеобразного опорного генератора. Показан фрагмент 12-секундной синхронной динамики измеренных модифицированным пневматическим датчиком сигналов артериального давления $P_{sen}(t)$ на запястье пациента и ЭКГ сигнала $V_{ecs}(t)$ на отведении от кистей обеих рук.

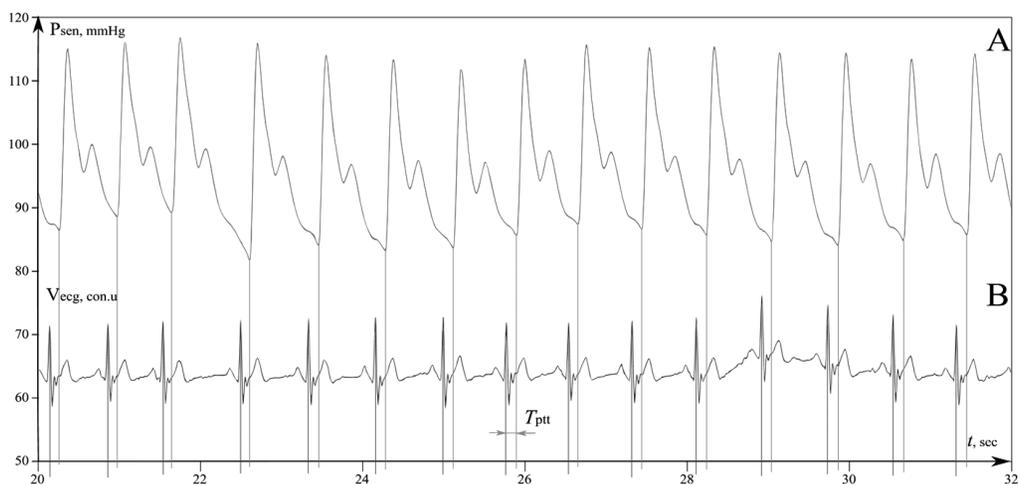


Рис. 1. Синхронные измерения сигналов АД (А) и ЭКГ (В). Вертикальными линиями отмечены моменты R-зубцов кардиограммы и соответствующие им минимумы (подножия – PV foots) пульсовой волны АД на лучевой артерии

Опубликованы исследования [6], в которых отмечается, что время задержки включает в себя заметное время «предызнания», которое следует учитывать при оценке СРПВ. Этот параметр имеет достаточно слабые индивидуальные вариации, по крайней мере внутри определенных групп обследуемых. Поэтому имея эти референтные значения для соответствующих групп и выяснив принадлежность пациента к определенной группе, можно на основе предложенного метода оценивать СРПВ только по измеренному (описанному выше) времени запаздывания, но с обязательной корректировкой его на время предызнания. Результаты соответствующего вычисления СРПВ на основе вышеизложенной технологии непрямого оценивания приведены на рисунке 2 для добровольцев разного возраста.

Для получения значения величины СРПВ были разработаны и использованы различные варианты измерительного датчика. В частности авторы и их коллеги прилагали значительные усилия по модернизации измерительного датчика с целью обеспечить возможность прямого измерения в районе подключичной артерии и иных труднодоступных мест и получения данных по эталонной методике прямых измерений. В докладе описываются различные варианты конфигурации измерительных датчиков и соответствующие им методики прямой и упрощенной «косвенной» обработки данных.

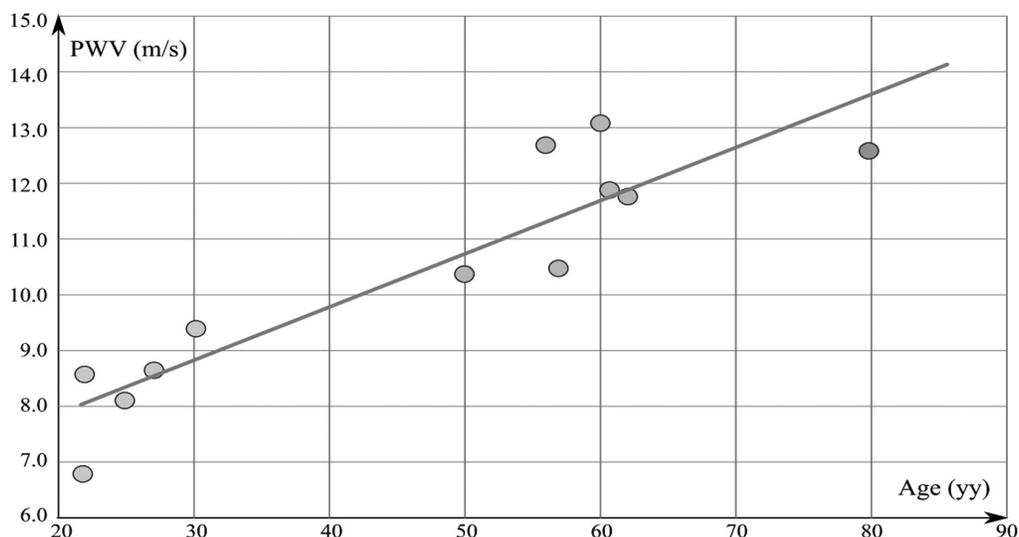


Рис. 2. Зависимость измеренных величин СРПВ (PWV, m/s) на промежутке от подключичной до лучезапястной позиций от возраста добровольцев (Age, yy)

Заключение

Таким образом, спектр применения ранее разработанной аппаратуры был существенно расширен. Была подтверждена возможность повышения качества субклинической и клинической диагностики состояния сердечно-сосудистой системы на предмет выявления риска получения целого ряда заболеваний, включая диагностику атеросклероза на ранних стадиях развития.

В дальнейшем представляется необходимым выполнение значительного объема совместных исследований со специалистами-кардиологами для уточнения ряда параметров и набора соответствующей медицинской статистики.

Публикуется с разрешения «Журнала радиоэлектроники»

Библиографические ссылки

1. Педли Т. Гидродинамика крупных кровеносных сосудов. М.: Мир, 1983. 400 с.
2. Патент на изобретение 2638712. Пневматический сенсор для непрерывного неинвазивного измерения артериального давления / В. Е. Анциперов, Г. К. Мансуров [и др.]. 2017.
3. Патент на изобретение 2675066. Монолитный трехкамерный пневматический сенсор с встроенными дроссельными каналами для непрерывного неинвазивного измерения артериального давления / В. Е. Анциперов, Г. К. Мансуров [и др.]. 2018.
4. Antsiperov V, Mansurov G. Positioning Method for Arterial Blood Pressure Monitoring Wearable Sensor. Bioinformatics and Biomedical Engineering. IWBBIO 2019, Rojas I, et al (eds). Lecture Notes in Computer Science, vol. 11465. Springer, Cham, 2019, pp. 405–414. DOI: 10.1007/978-3-030-17938-0_36.
5. Использование пневматического датчика в задаче непрерывного неинвазивного мониторинга артериального давления и пульсовой волны / Г.К. Мансуров, М.В. Данилычев,

Анциперов В.Е. и др. Оценка скорости распространения пульсовой волны артериального...

В.Е. Анциперов, А. С. Бугаев // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 5. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.5.9.

6. Kortekaas M.C. Small intra-individual variability of the pre-ejection period justifies the use of pulse transit time as approximation of the vascular transit. PLoS ONE, 2018, vol. 13, no. 10, pp e0204105. DOI: 10.1371/journal.pone.0204105.

References

1. Pedley T. *Gidrodinamika krupnykh krovenosnykh sosudov* [Hydrodynamics of large blood vessels]. Moscow, Mir Publ., 1983, 400 p. (in Russ.).
2. Antsiperov V.E., Mansurov G.K. Patent for invention 2638712 (in Russ.).
3. Antsiperov V.E., Mansurov G.K. Patent for invention 2675066 (in Russ.).
4. Antsiperov V., Mansurov G. Positioning Method for Arterial Blood Pressure Monitoring Wearable Sensor. *Bioinformatics and Biomedical Engineering. IWBBIO 2019*, Rojas I, et al (eds). *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 11465. Springer, Cham, 2019, pp. 405–414. DOI: 10.1007/978-3-030-17938-0_36.
5. Mansurov G.K., Danilychev M.V., Antsiperov V.E., Bugaev A.S. [The use of a pneumatic sensor in the task of continuous non-invasive monitoring of blood pressure and pulse wave]. *Zhurnal radioelektroniki*, 2020, no. 5. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.5.9 (in Russ.).
6. Kortekaas M.C. Small intra-individual variability of the pre-ejection period justifies the use of pulse transit time as approximation of the vascular transit. PLoS ONE, 2018, vol. 13, no. 10, pp e0204105. DOI: 10.1371/journal.pone.0204105.