

# Особенности фронтов сигнала поглощения лазерного излучения при экспресс-диагностике состояния здоровья человека

М.А. Якушева  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия  
yakusheva.ma@edu.spbstu.ru

Р.В. Давыдов  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого  
Санкт-Петербург, Россия  
davydovrv@spbstu.ru

Д.Д. Исакова  
Санкт-Петербургский  
государственный университет  
телекоммуникаций им. проф.  
М.А.Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, Россия  
isakova.dd@spbgut.ru

**Аннотация**—Обоснована необходимость поиска новых решений по расширению возможностей пульсоксиметрии с использованием сигнала поглощения лазерного излучения. Проведены исследования для определения направлений, которые позволят расширить функциональные возможности пульсоксиметрии с использованием сигнала поглощения. Установлены факторы, которые позволяют увеличить отношение сигнал/шум регистрируемого сигнала поглощения. Высокий уровень отношения сигнал/шум регистрируемого оптического сигнала поглощения необходим для исследования фронтов нарастания и спада сигнала пульсовой волны, а также области её центрального пика. Предложены новые методики обработки этих фронтов, которые состоят из большого числа ступенек разной длительности и амплитуды. Высокий уровень отношения сигнал/шум (более 15) позволяет получить на фотоприёмном устройстве максимальное разрешение по этим ступенькам. Представлены результаты исследований состояния человека в реальном времени. Полученные данные вместе с классическими критериями состояния здоровья человека (пульс и содержания кислорода в крови) позволяют достовернее оценить его здоровье и наличие ряда заболеваний.

**Ключевые слова**— лазерное излучение, поток крови, отношение сигнал/шум, поглощение, сатурация, пульсовая волна, фронт, методика.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях ухудшения экологии, увеличения стрессовой нагрузки по различным причинам, а также появления новых опасных заболеваний (например, COVID-19) человеку в большинстве случаев необходимо регулярно контролировать состояние своего здоровья [1]. Для решения этой задачи разработаны различные методы экспресс-диагностики в реальном времени. Одним из важнейших условий их востребованности у людей является возможность выполнить данную диагностику самостоятельно в необходимое время в различной ситуации (дома, на работе, в дороге). Поэтому среди населения большое распространение в способах экспресс-диагностики получили как традиционные критерии (температура, кровяное давление), так и пульсоксиметрия [2]. К достоинствам последней следует отнести бесконтактность измерений при получении данных о пульсе и содержании кислорода в крови.

Используя данные о параметрах пульсовой волны, можно предполагать наличие и оценивать последствия ряда заболеваний. Так, согласно данным британских и

итальянских исследователей, вероятность смерти при COVID-19 можно считать повышенной, если скорость распространения пульсовой волны  $v$  по артериям превышает 13 метров в секунду.

С другой стороны, при эксплуатации современных конструкции пульсоксиметров возникает ряд проблем, которые связаны с наличием артефактов при измерениях, а также использованием простых методик при обработке сигнала поглощения или отражения лазерного излучения. Это приводит в ряде случаев к очень большим погрешностям измерения (более 50 %) и недостоверной интерпретации данных. Такая недостоверная информация может нанести психологический вред человеку, особенно если он её получил на фоне плохого самочувствия. Поэтому разработка новых методик и различных технических решений для повышения достоверности результатов экспресс-диагностики состояния здоровья человека является крайне актуальной задачей.

## 2. ФОРМА ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ И МЕТОДИКИ ЕЁ ОБРАБОТКИ

Среди населения наибольшее применение получила трансмиссионная пульсоксиметрия. Ранее проведенные нами исследования позволили при регистрации сигнала поглощения лазерного излучения разработать ряд способов повышения отношения сигнал/шум. В этом случае влияние артефактов на результаты измерений становится более ясным, и, переключив прибор, можно провести диагностику состояния здоровья снова. В форме пульсовой волны, построенной по изменению амплитуд сигналов поглощения, на кровеносных сосудах и мягких тканях более ярко выражены пики, из которых состоит фронт. Количество пиков, которые можно использовать для обработки в фронтах пульсовой волны, при этом увеличивается вместе с объемом информации о состоянии здоровья человека, содержащийся в этих пиках.

Математическая модель в виде экспоненциальных зависимостей для обработки фронтов пульсовой волны по вершинам пиков, которая использовалась ранее, в данной ситуации не актуальна. Это связано с тем, что число точек (вершин пиков), по которым выполняется аппроксимация экспонентой, менее 25 % (достоверность результата крайне низкая). Кроме того, в этой модели никак не учитывается пульсация мышц сердца и разная структура

кровеносных сосудов и вен, которая влияет на параметры ступенек.

Поэтому нами была разработана новая методика, состоящая из трех частей. Предлагается процесс обработки структуры пульсовой волны разделить на три части. Отдельно исследовать фронт нарастания, фронт спада, а также пик пульсовой волны с учетом характера изменения рядом расположенных ступенек. Обязательно предусмотреть в модели обработки коэффициент учитывающий возраст человека, так как со временем стенки сердечной мышцы ослабевают и не способны работать в полную силу. В соответствии с этим нами были разработаны три функции. Функция  $F(t)$  для исследования гребня пульсовой волны:

$$F(t_n) = F\left(\sum_{n=m-p}^{n=m+p} \Delta\tau_n\right) = \left|\frac{A_n - A_{n-1}}{\Delta\tau_n}\right|, \quad (1)$$

где  $m$  – номер ступеньки максимума,  $p$  – коэффициент, зависящий от возраста человека,  $A_n$ ,  $\Delta\tau_n$  – амплитуды и длительности ступенек.

Функция  $\Phi(t)$  для исследования фронта пульсовой волны:

$$\Phi(t_n) = \sum_{n=1}^{n=m-1} \left( A_n \cdot \sum_{n=1}^{n=m-1} \left[ \frac{\Delta\tau_n}{\Delta\tau_m \cdot \frac{(m-1)}{p}} \right]^n \right). \quad (2)$$

Функция  $\Psi(t)$  для исследования спада пульсовой волны:

$$\Psi(t) = A_m \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau_k} \cdot \frac{n-m}{m}\right) \frac{n-m}{p(A_{k-1}-A_k)}. \quad (3)$$

На значения  $t_n$  и  $t_k$  накладываются следующие ограничения  $\tau_m < t$ ,  $\tau_{k-1} < t < \tau_k$ , где  $k$  – номер ступеньки спада.

Особенностью данной модели является то, что релаксационный процесс рассматривается для каждой ступеньки в отдельности. Далее осуществляется «сшивание» зависимостей на границах ступенек. В случае отсутствия заболеваний в организме человека получается гладкая зависимость с небольшими искажениями. В остальных случаях на границах ступенек образуется «скачок» по амплитуде, который заносится в таблицу с учетом знака. Далее характер изменения этих скачков необходимо исследовать отдельно.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОЙ МЕТОДИКИ

На рис. 1-3 в качестве примера представлены результаты исследования гребня, а также фронтов нарастания и спада пульсовой волны девушки 22-х лет с использованием формул (1), (2) и (3).

Анализ полученных данных показывает их информативность, связанную с изменениями в здоровье человека. Например, при сопоставлении спектральных распределений гребней пульсовых волн (рис. 1) различных людей можно установить существенные различия в их структуре, которые явно связаны с

отклонениями в организме человека. Это позволяет установить наличие патологий или заболеваний.

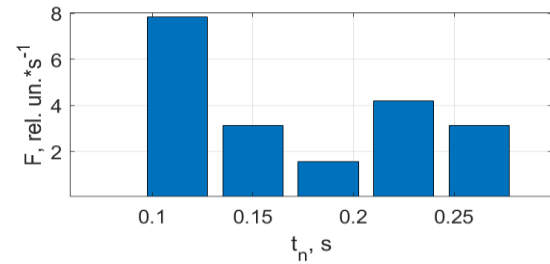


Рис. 1. Спектральные составляющие гребня пульсовой волны

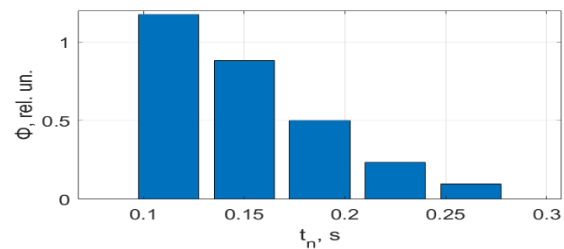


Рис. 2. Спектральные составляющие фронта нарастания пульсовой волны

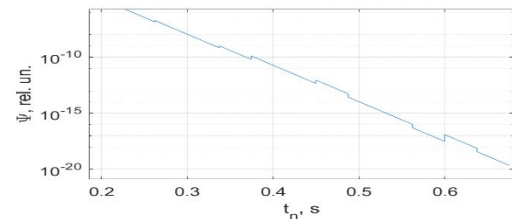


Рис. 3. Спектральные составляющие фронта спада пульсовой волны

Несмотря на перенесенное заболевание COVID-19 за две недели до измерений, полученные результаты показывают очень хорошее состояние организма (рис. 2 и 3). Иммуная система справилась со своей функцией, и патологий, как у других исследуемых, не установлено.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ проведенных исследований показал эффективность предлагаемой методики для получения большего объема информации при обработке сигнала пульсовой волны. Однако для реализации данной методики необходима база данных, которая позволит с большей вероятностью определять болезни на ранней стадии по характеру изменения в гребне, фронтах нарастания и спада пульсовых волн.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Masing, M.S. Monitoring of oxygen supply of human tissues using a noninvasive optical system based on a multi-channel integrated spectrum analyzer / M.S. Masing, A.Y. Zaitceva, Y.Y. Kislyakov // International Journal of Pharmaceutical Research. – 2020. – Vol. 12. – P. 1974.
- [2] Gataulin, Y.A. Structure of unsteady flow in the spatially curved model of the common carotid artery with stenosis: A numerical study / Y.A. Gataulin, D.K. Zaitsev, E.M. Smirnov // Russian Journal of Biomechanics. – 2019. – vol. 23(1). – P. 58.