

УДК 535.243

**Аппаратно-программный комплекс контроля церебрального
кровообращения в критических состояниях методом тканевой
оксиметрии**

Пика Т.О., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Медико-технические информационные технологии»*

Научный руководитель: Сафонова Л.П., к.т.н, доцент

Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

bauman@bmstu.ru

1 Введение

Одной из важнейших проблем современной анестезиологии и хирургии является оценка функционального состояния головного мозга и, в частности, его кислородного статуса во время анестезии. Различные неврологические расстройства, вплоть до фатальных, занимают одно из лидирующих мест в статистике анестезиологических осложнений. Основными причинами этих осложнений являются гипоксические состояния головного мозга, вызванные либо нарушением церебральной перфузии, либо гипоксемией различного генеза [1]. Продолжительная гипоксия определяет соответствующий прогноз с летальностью, превышающей 80 % [2].

Таким образом, *актуальность* данной работы определяется:

- отсутствием в современных стандартах мониторинга способов непосредственного оперативного контроля гипоксии тканей мозга;
- отсутствием в медицине критических состояний измерительных комплексов, позволяющих на единой методической и метрологической базе количественно оценивать требуемые параметры церебрального кровообращения и сатурации;
- сложностью интерпретации для врача-анестезиолога многоприборных измерений и принятия решений на их основе.

Весьма перспективным методом изучения процессов тканевого дыхания головного мозга и непосредственного интраоперационного мониторинга церебральной гипоксии

представляется метод тканевой оксиметрии или спектрофотометрии биотканей в красном и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн [1].

Спектрофотометрия биотканей позволяет получать информацию о функциональной активности биологической ткани и ее метаболизме, о работе системы транспорта кислорода и гипоксических состояниях различного генеза. Благодаря этому спектрофотометрия биотканей и одно из направлений – тканевая оксиметрия - занимают прочное положение в решении важных задач функциональной диагностики в мировой клинической практике и являются активно развивающимися в настоящее время областями неинвазивной диагностики.

В связи с этим, целью работы являлось обеспечение соответствия между функциональными характеристиками церебрального оксиметра и требованиями медицины критических состояний.

2 Постановка задачи

Разработка АПК проводилась на основании стандартов, регламентирующих минимальные требования по обеспечению безопасности пациентов во время анестезии (табл. 1) [3, 4] и с учетом достоинств и ограничений существующих современных коммерчески доступных тканевых оксиметров (табл. 2) [5, 6].

Анализ требований стандартов (табл. 1) показал, что метод тканевой оксиметрии, рассматриваемый в данной работе, позволяет заменить пульсовые оксиметры (входящие в минимальные требования стандартов), осуществлять дополнительный перекрестный контроль параметров (ЧД) и получать дополнительную - наиболее важную в критических состояниях - информацию о церебральном кровообращении, оксигенации тканей мозга и возможных гипоксических состояниях, не контролируемую напрямую при современном мониторинге в критических состояниях [3, 4].

Таблица 1

Общие требования стандартов по обеспечению безопасности пациентов во время анестезии [3, 4]

Требование стандарта	Метод	Реализация
Нахождение анестезиолога-реаниматолога и медицинской сестры-анестезиста рядом с	-	постоянно

больным		
Контроль оксигенации	Контроль концентрации кислорода в дыхательной смеси	непрерывно
	Насыщение артериальной крови кислородом	непрерывно
Контроль вентиляции	Спирометрия и капнография	непрерывно
	Контроль герметичности дыхательного контура при ИВЛ	непрерывно
Контроль гемодинамики	Электрокардиоскопический контроль	непрерывно
	Измерение АД и частоты сердечных сокращений	через каждые 5 минут
Контроль температурного гомеостаза	Измерение температуры тела	при необходимости

При анализе существующих современных коммерчески доступных тканевых оксиметров было показано, что одним из их ограничений является невозможность определения абсолютных значений концентраций хромофоров (табл. 2) [5, 6]. На российском рынке церебральные оксиметры, разрешенные для клинического использования, представлены двумя американскими фирмами: CASMED (FORE-SIGHT) и Somanetics (INVOS). Во всех перечисленных оксиметрах используется метод непрерывного излучения, который позволяет оценивать только относительные изменения параметров.

Абсолютные значения параметров дают оксиметры с временным и частотным подходами. К таким оксиметрам относятся, например, «TRS20» фирмы Hamamatsu (Япония) и «OxiplexTS» фирмы ISS Inc. (США), разрешенных к применению в исследовательских целях. В ходе проведенных исследований было показано, что расчет абсолютных значений параметров для частотного подхода по формулам и алгоритмам, представленным в патентах и других литературных данных для оксиметра «OxiplexTS», является некорректным (рис. 1) [5, 6, 7-9].

Таблица 2

Сравнение параметров и характеристик тканевых оксиметров с различными подходами
[5, 6]

Непрерывный режим	Частотный подход	Временной подход
Определение абсолютных значений		
-	+	+
Сложность технической реализации		
		
Стоимость оксиметра		
		
Наличие беспроводных реализаций		
+	-	-
Возможность многоканального картирования		
да	да	да
Временное разрешение		
< 50 Гц	до 100 Гц	
Пространственное разрешение		
~ 10 мм	~ 5 мм	
Определяемые параметры		
$\Delta\mu_a, \Delta[HbO_2], \Delta[HHb],$ $\Delta[THb], StO_2$	$\mu_a, [HbO_2], [HHb], [THb], StO_2$	

Таким образом, в данной работе решались следующие задачи, направленные на устранение выявленных ограничений существующих оксиметров и на достижение поставленной цели:

- анализ формул расчета параметров с помощью метода тканевой оксиметрии;
- определение совокупности информативных параметров тканевой оксиметрии в медицине критических состояний и разработка способа представления параметров тканевого оксиметра;
- разработка программной реализации предложенных алгоритмов;
- разработка структурно-функциональной схемы разрабатываемого АПК.

3 Анализ формул для расчета параметров

3.1 Расчет основных оптических и гемодинамических параметров

Основными параметрами тканевой оксиметрии являются коэффициент поглощения (μ_a), тканевая сатурация (StO_2) и концентрации основных хромофоров биологических тканей – окси-, дезокси- и общего гемоглобина ($[HbO_2]$, $[HHb]$, $[THb]$).

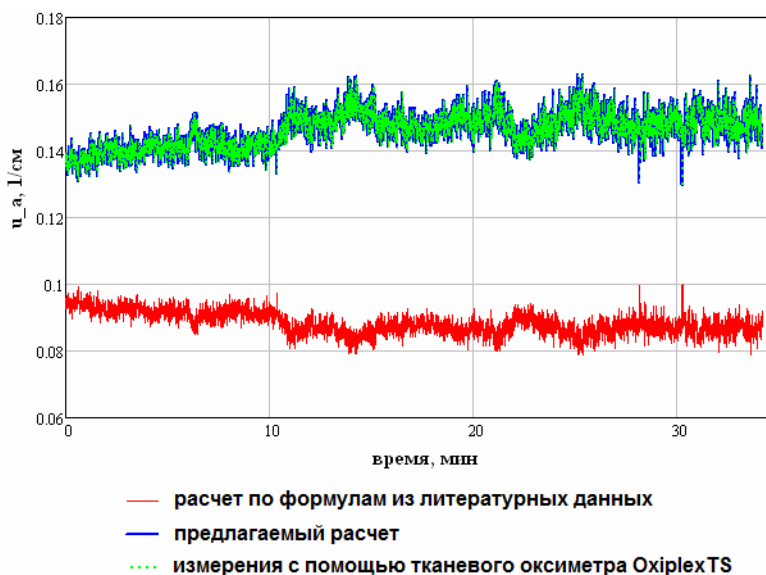
Расчет по формулам из литературных данных:

$$\mu_a = \frac{\omega}{2v} \left(\frac{S_\Phi}{S_{AC}} - \frac{S_{AC}}{S_\Phi} \right)$$

$$\frac{\omega}{2v} \approx 0,15 \left[\frac{1}{\text{см}} \right]$$

Предлагаемый расчет

$$\mu_a = -0,885 \frac{S_{AC}}{S_\Phi} - 0,003$$



S_{AC} , S_Φ – наклоны характеристик $\ln\{AC \cdot r^2\}(r)$ и $\Phi(r)$ соответственно; $\omega = 2\pi f$ – частота модуляции;
 v – скорость света в среде, см/с.

Рис. 1. Сравнение данных, полученных с помощью расчетных формул из литературы [5, 6, 7-9], предлагаемого алгоритма аппроксимации и тканевого оксиметра OxiplexTS

При работе с экспериментальными данными, полученными с помощью тканевого оксиметра «OxiplexTS» с частотным многодистантным подходом, был предложен способ аппроксимации (рис. 1) для определения коэффициента поглощения. Расчетный алгоритм принят с уровнем значимости 5%. Полученная формула позволяет восстанавливать коэффициенты поглощения из исходных данных с погрешностью менее 1% по сравнению со значениями, получаемыми при помощи тканевого оксиметра. Главным недостатком данной модели является зависимость коэффициентов от параметров тканевого оксиметра (таких, как частота модуляции зондирующего излучения) и отсутствие математического или физиологического обоснования расчетной формулы.

В связи с этим был предложен, теоретически и практически проверен новый способ определения абсолютных значений основных параметров тканевой оксиметрии на базе

подхода с непрерывным излучением. Это позволяет устранить главный недостаток тканевых оксиметров с непрерывным излучением – невозможность определения абсолютных значений требуемых параметров, - упростить и удешевить техническую реализацию тканевого оксиметра.

Определение абсолютных значений таких параметров, как $[HbO_2]$, $[HHb]$ и $[THb]$ в тканевых оксиметрах с непрерывным режимом излучения возможно из анализа взаимной динамики сигналов StO_2 и $(\Delta[HbO_2]-\Delta[HHb])$. При этом относительные отклонения полученных предлагаемым способом значений $[THb]$ от рассчитываемых методом, реализованным в «OxiplexTS», составили $\delta=9\pm7\%$ для 16 записей испытуемых при измерениях на лбу в процессе дыхательной нагрузки.

3.2 Определение дополнительных расчетных параметров

Анализ минимальных требований по обеспечению безопасности пациентов во время анестезии [3, 4] показал, что расширение функциональных возможностей тканевого оксиметра связано с определением параметров кровообращения и дыхания, пульсоксиметрических и сочтанных дополнительных информативных параметров (рис. 2).



Рис. 2. Расширение функциональных возможностей тканевого оксиметра

Для определения ЧСС и артериальной сатурации в данной работе предложен алгоритм фильтрации оптического сигнала для определения максимальной амплитуды спектра в области пульсовых колебаний и соответствующей ЧСС (рис. 3).

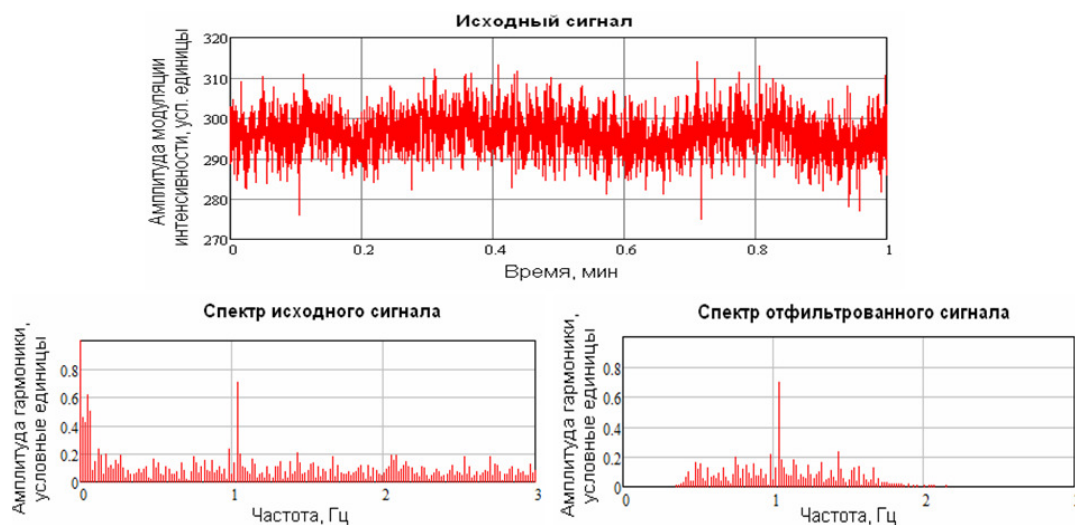


Рис. 3. Определение ЧСС. Максимальная амплитуда равна 0,699 условных единиц; частота, соответствующая максимальной гармонике $f_{max} = 1,034$ Гц; ЧСС=62 уд/мин.

На основании амплитудных значений возможно вычисление SaO_2 (рис. 4) [10].

Таким образом, функции пульсового оксиметра – обязательного элемента мониторинга в критических ситуациях – способен выполнять тканевый оксиметр.

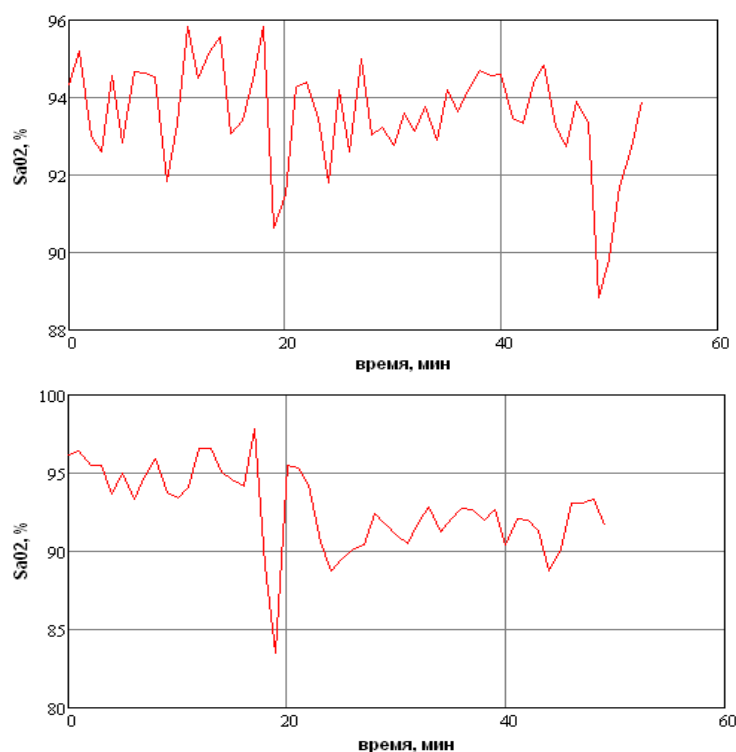


Рис. 4. Расчет SaO_2 у различных испытуемых

Дополнительным перекрестно определяемым параметром, рассчитываемым по оптическим сигналам, и сходным алгоритмам является ЧД. При определении ЧД необходимо учитывать как максимальную амплитуду гармоники, так и ее частоту (рис. 5). При амплитуде дыхательной компоненты ниже критического уровня можно говорить об отсутствии дыхательных движений у испытуемого.

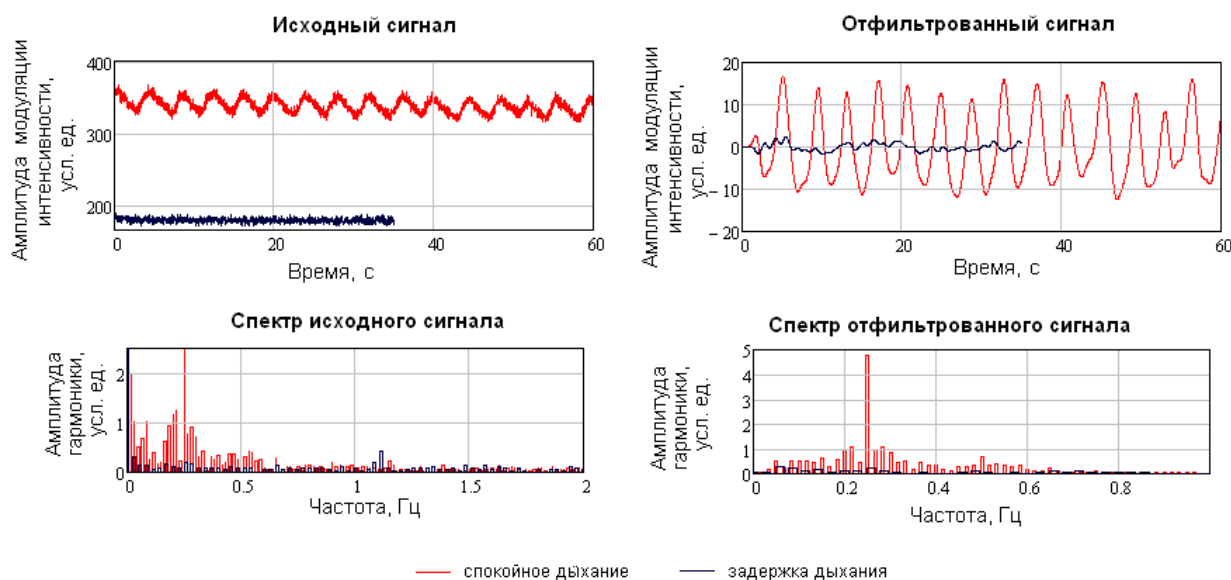
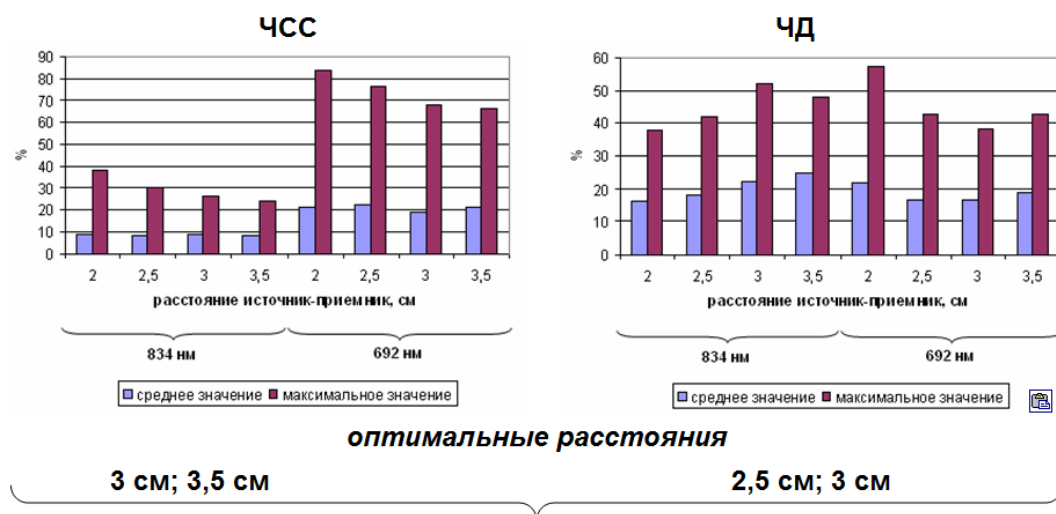


Рис. 5. Определение ЧД в покое и при задержке дыхания

Анализ работы алгоритмов определения ЧСС и ЧД с помощью программной реализации (рис. 6) показал, что количество расстояний между источником и приемником в разрабатываемом АПК можно ограничить тремя расстояниями.



В разрабатываемом АПК следует использовать расстояния 2,5; 3 и 3,5 см и провести оптимизацию выбора длин волн

Рис. 6. Анализ работы алгоритмов определения ЧСС и ЧД

Расчет церебрального объема крови (CBV) – одного из информативных параметров в критических состояниях – проводился по формулам, представленным в литературных данных [5, 11].

4 Способ представления данных

Важным в критических состояниях является отображение информации для удобства восприятия и быстрого принятия решений. Динамика сигналов тканевого оксиметра более наглядна не в отдельных временных сигналах (рис. 7), а в их комбинации. Представление данных в виде графика $Hb_D=f(SiO_2)$ одномоментно отражает и объем крови, и тканевую сатурацию (рис. 8) [5].

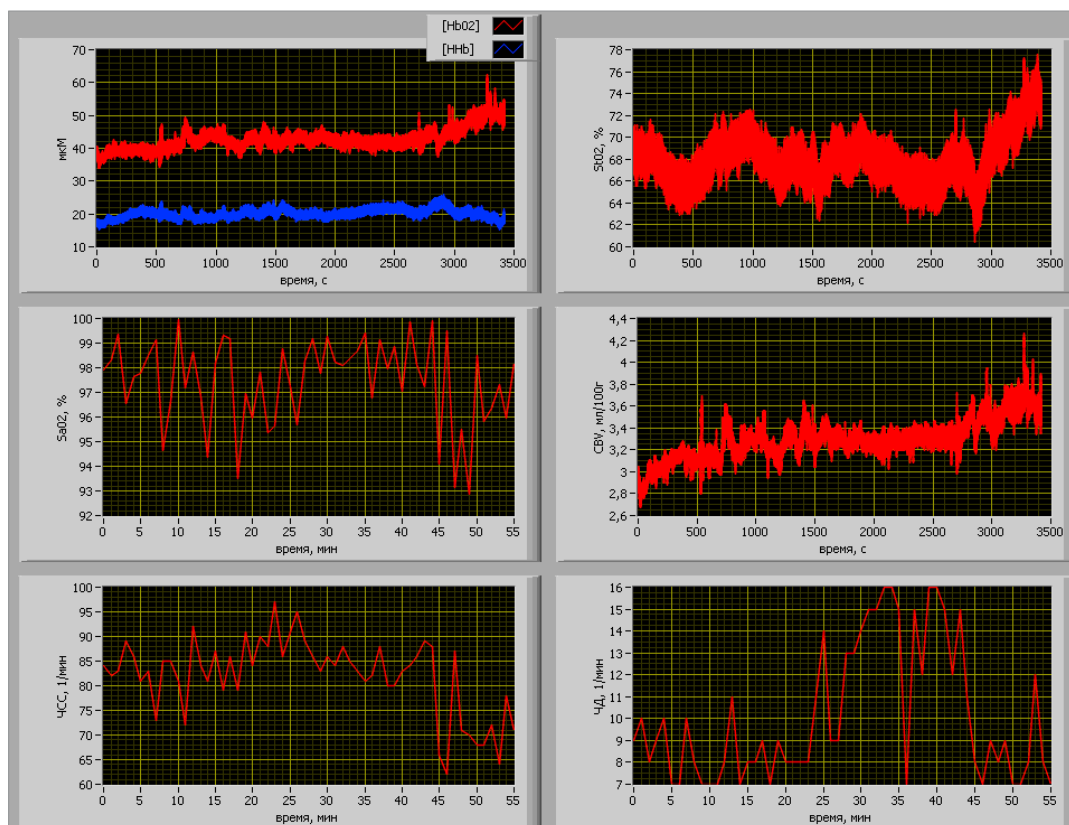


Рис. 7. Представление данных в виде отдельных временных сигналов

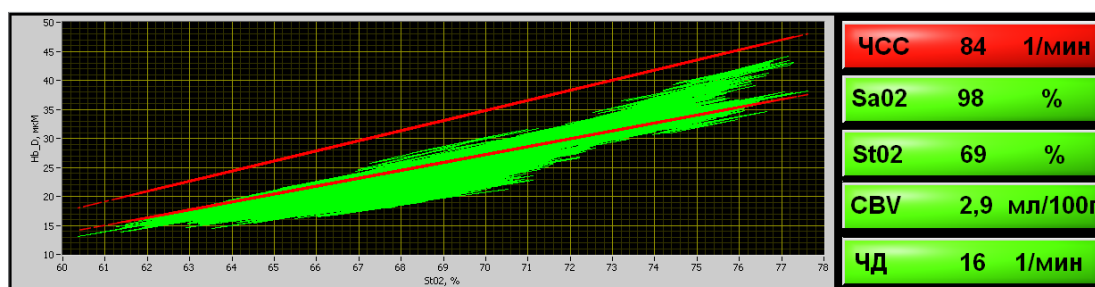


Рис. 8. Представление данных в виде графика $Hb_D=f(StO_2)$

5 Разработка структурно-функциональной схемы АПК

С учетом полученных результатов, была разработана структурно-функциональная схема двухканального церебрального оксиметра с непрерывным режимом излучения и трех-дистантными измерениями (рис. 9).

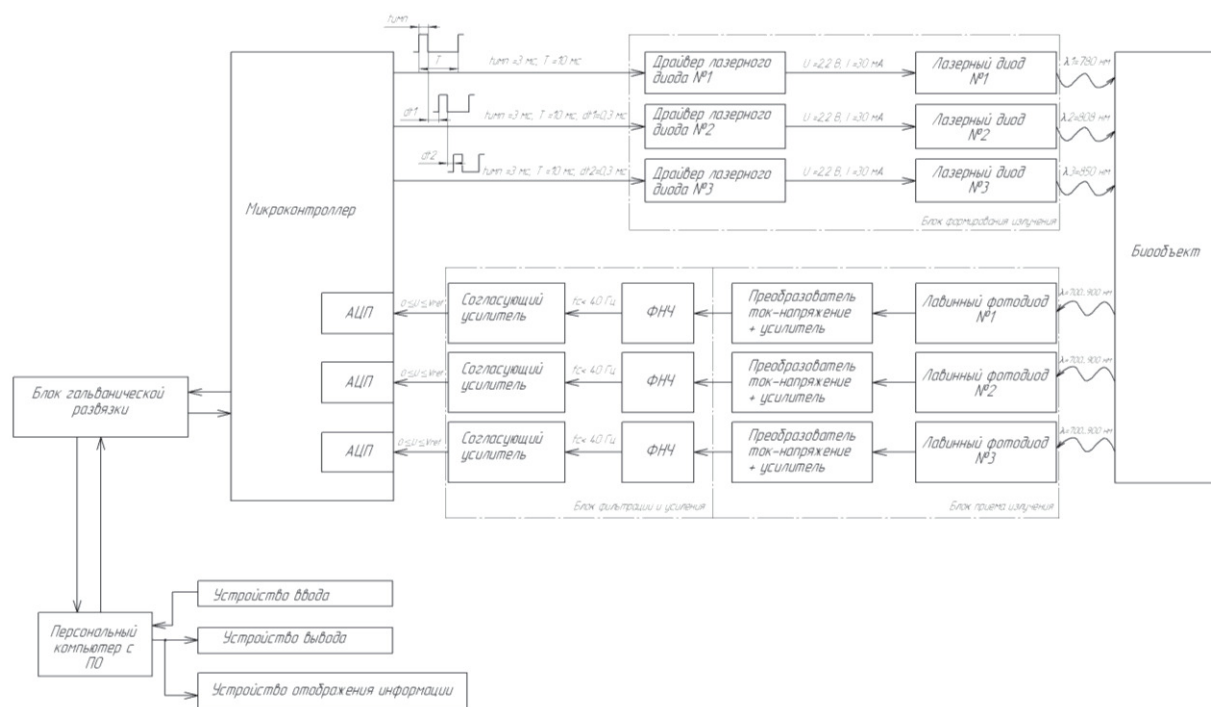


Рис. 9. Структурно-функциональная схема АПК

Применяемый в разрабатываемом АПК подход с непрерывным излучением позволяет определять абсолютные значения оптических параметров. В качестве источников излучения используются лазерные диоды мощностью менее 5 мВт с длинами волн 780, 808 и 850 нм для определения концентраций фракций гемоглобина и воды, количество расстояний источник-детектор равно 3 (табл. 3).

Следует отметить, что введение третьей длины волны позволяет не только определять изменения концентрации воды в объеме ткани, но и минимизировать погрешность определения концентраций гемоглобина, а также определять абсолютное значение гематокрита (Htc). Расчет оптимальных длин волн проводился в соответствии с алгоритмом минимизации погрешности определения концентраций хромофоров и разделения эффектов рассеяния и поглощения.

Таблица 3

Основные параметры разрабатываемого АПК

Режим излучения	непрерывный подход
Характеристика измерений	абсолютные значения
Измеряемые параметры	$[HbO_2]$, $[Hb]$, $[THb]$ —

	концентрации окси-, дезокси- и общего гемоглобина соответственно;
	$\Delta[H_2O]$ – изменение концентрации воды;
	StO_2 , SaO_2 – тканевая и артериальная сатурации соответственно;
	ЧСС, ЧД – частота сердечных сокращений и частота дыхания;
	CBV – церебральный объем крови;
Количество каналов	2 (билатеральные измерения)
Количество расстояний источник-детектор	3 (2,5 см, 3,0 см, 3,5 см)
Источник излучения	лазерный диод
Количество длин волн	3: 780 нм, 808 нм, 850 нм (оптимизированы)
Количество лазерных диодов для одного канала	3
Мощность лазерных диодов, мВт	≤ 5
Приемник излучения	лавинный фотодиод
Количество приемников для одного канала	3

6 Выводы

Основные результаты, полученные в ходе работы:

- разработан способ определения абсолютных значений параметров тканевой оксиметрии на основе подхода с непрерывным излучением;
- расширены функциональные возможности тканевых оксиметров применительно к медицине критических состояний, предложен вариант представления данных для оценки индивидуальной реакции и контроля гипоксических состояний;
- разработаны алгоритмы обработки данных и их программные реализации, проведена экспериментальная верификация алгоритмов и программ.

Таким образом, результаты работы показали, что функциональные возможности тканевого оксиметра можно расширить, обеспечив при этом соответствие требованиям медицины критических состояний.

Список литературы

1. Михельсон В.А., Прокопьев Г.Г., Лазарев В.В. Церебральная оксиметрия в анестезиологии детского возраста. Режим доступа: <http://rusanesth.com/Genan/nirs.htm> (дата обращения 01.05.2014).
2. Экстракорпоральная мембранная оксигенация. Режим доступа: <http://surgeryzone.net/medicina-lyudyam/ekstrakorporalnaya-membrannaya-oksigenaciya.html> (дата обращения 01.05.2014).
3. Минимальный обязательный стандарт мониторинга в анестезиологии и интенсивной терапии. Принят 30.01.2009. 3 с. Режим доступа: http://tele.med.ru/stadart_monitoring.pdf (дата обращения 01.05.2014).
4. Стандарт МО РФ «О мерах по обеспечению безопасности больных во время анестезии, реанимации и интенсивной терапии» № 161/ДМ-2 от 24 февраля 1997 г. 1 с. Режим доступа: http://www.anest-cfo.ru/standarts/General_Anesteziya/Standart_MO_RF.pdf (дата обращения 01.05.2014).
5. Оптическая биомедицинская диагностика. В 2 т. Т. 1 / пер. с англ. под ред. В. В. Тучина. М.: Наука, Физматлит, 2007. 560 с.
6. Сафонова Л. П. Спектрофотометрия в функциональной диагностике. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 67 с.
7. The effect of basic assumptions on the tissue oxygen saturation value of near infrared spectroscopy / Andreas Jaakko Metz, Martin Biallas, Carmen Jenny, Thomas Muehlemann, Martin Wolf // Oxygen Transport to Tissue XXXIV. 2013. Vol. 765. P. 169-175.
8. Absolute measurement of cerebral optical coefficients, hemoglobin concentration and oxygen saturation in old and young adults with near-infrared spectroscopy / Bertan Hallacoglu, Angelo Sassaroli, Michael Wysocki, Elizabeth Guerrero-Berroa, Michal Schnaider Beerli, Vahram Haroutunian, Merav Shaul, Irwin H. Rosenberg, Aron M. Troen, and Sergio Fantini // Journal of Biomedical Optics. 2012. Vol. 17(8). Available at: <http://biomedicaloptics.spiedigitallibrary.org>, accessed 01.05.2014
9. Influence of a superficial layer in the quantitative spectroscopic study of strongly scattering media / Maria Angela Franceschini, Sergio Fantini, L. Adelina Paunescu, John S. Maier, and Enrico Gratton // APPLIED OPTICS. 1998. Vol. 37, No. 31. P. 7447-7458.
10. Absolute frequency-domain pulse oximetry of the brain: methodology and measurements / Martin Wolf, Maria A. Franceschini, Lelia A. Paunescu, Vlad Toronov, Antonios Michalos,

Ursula Wolf, Enrico Gratton and Sergio Fantini // Oxygen Transport to Tissue XXIV. 2003. P. 61-73.

11. Assessment of Infant Brain Development with Frequency-Domain Near-Infrared Spectroscopy / Maria Angela Franceschini, Sonal Thaker, George Themelis, Kalpathy K. Krishnamoorthy, Heather Bortfeld, Solomon Gilbert Diamond, David A. Boas, KaraArvin, and P. Ellen Grant // PEDIATRIC RESEARCH. 2007. Vol. 61, No. 5. Available at: http://bortfeld.psy.uconn.edu/UCONNWeb/Franceschini_etal_PR2007.pdf, accessed 01.05.2014.