

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 621.389

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-81-92

Разработка и исследование программно-аппаратного комплекса для мониторингирования состояния домашнего животного^{*}

Д.А. КРИВОНОГОВА^а, З.Н. ПЕДОНОВА^б

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный
технический университет

^а krivdah@gmail.com ^б pedonovaz@gmail.com

В настоящей статье проанализировано современное состояние и потенциал использования пульсоксиметров в ветеринарии. Перспективные оптические методы, такие как оптическая когерентная томография, пульсоксиметрия и гиперспектральная визуализация, клинически введены в медицину человека. Но даже несмотря на то что медицина человека и мелких животных разделяет персонализированный современный подход, биофотоника по-прежнему редко используется в ветеринарной медицине. Пульсоксиметры чаще всего применяются при мониторингировании состояния животного во время общего наркоза.

Будущие оптические приборы для мелких животных, таких как собаки и кошки, должны быть надежными и устойчивыми к повреждениям (например, из-за укусов, жевания) и гарантировать удобные и короткие измерения. Потенциал использования пульсоксиметров для мониторинга домашних животных еще предстоит изучить.

В работе рассматривались два метода измерения: «на просвет» и «на отражение». На основе литературных источников можно сделать вывод, что метод оптической оксиметрии «на отражение» обладает такой же диагностической ценностью, что и метод «на просвет», и поэтому может быть использован для ветеринарных пульсоксиметров без потери в точности измерения пульса и оксигенации крови.

По результатам обзора существующих приборов было выяснено, что в основном в них используется способ «на просвет». Этот метод удобен для проведения измерений у животных, находящихся под наркозом, однако для использования на активно двигающихся животных это проблематично.

Целью настоящей работы является разработка новой модели пульсоксиметра для животных. Предложен новый вид прибора на неиспользуемом методе, описаны его достоинства и недостатки. Предложены компоненты для создания и построена схема на основе этих компонентов.

Ключевые слова: частота пульса, оксиметрия, домашние животные, фотоплетизмография, пульсоксиметр, диагностика, мониторингирование, сатурация

^{*} Статья получена 22 июля 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] проанализировано современное состояние и потенциал биофотоники и биомедицинской оптики в ветеринарии. Перспективные оптические методы, такие как оптическая когерентная томография, пульсоксиметрия и гиперспектральная визуализация, клинически введены в медицину человека [2]. Но даже несмотря на то что медицина человека и мелких животных разделяет персонализированный современный подход, биофотоника по-прежнему редко используется в ветеринарной медицине. Однако в ветеринарной онкологии существует ряд биофотонических исследований, посвященных диагностике опухолей (опухоли кожи и подкожной клетчатки), прогнозу (лимфома) и терапии (четкие хирургические границы) [1]. Видимая и ближняя инфракрасная спектроскопия служила для измерения различных физиологических параметров, связанных с кровообращением, а фотобиомодуляционная терапия часто использовалась для лечения ран, кожных заболеваний и ортопедических проблем [3–7]. Пульсоксиметры чаще всего применяются при мониторинговании состояния животного во время общего наркоза [3–6].

В статье [8] приведена разработка пульсоксиметра для лошадей. Исследования показали, что разработанное устройство удобнее в использовании за счет нового крепления и дает те же необходимые технические характеристики, что и аналогичные ветеринарные пульсоксиметры.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будущие оптические приборы для мелких животных, таких как собаки и кошки, должны быть надежными и устойчивыми к повреждениям (например, из-за укусов, жевания) и гарантировать удобные и короткие измерения. Потенциал пульсоксиметра для мониторинга домашних животных еще предстоит изучить. Целью настоящей работы ставится исследование возможности внедрения нового метода измерения в пульсоксиметры для животных и разработка схемы прибора для реализации данного метода.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В пульсоксиметрии измеряют функциональную сатурацию оксигемоглобина в крови ($f_{\text{un}}\text{SO}_2$), которую определяют как процентное содержание оксигемоглобина (C_{HbO_2}) к сумме концентраций оксигемоглобина и восстановленного гемоглобина (дезоксигемоглобина (C_{Hb})) [9]:

$$f_{\text{un}}\text{SO}_2 = \frac{\text{C}_{\text{HbO}_2}}{\text{C}_{\text{HbO}_2} + \text{C}_{\text{Hb}}} 100 \%. \quad (1)$$

Также измеряется фракционная сатурация $f_{\text{T}}\text{SO}_2$ оксигемоглобина в крови, или просто сатурация, процентное содержание оксигемоглобина (C_{HbO_2}) к сумме концентраций всех фракций гемоглобина, включая метгемоглобин (metHb), карбоксигемоглобин* (HbCO).

Если предположить, что в крови кроме HbO_2 и Hb отсутствуют другие фракции гемоглобина, можно опустить передние индексы f_{in} и f_{r} в обозначениях сатурации оксигемоглобина, как и поступают в большинстве случаев.

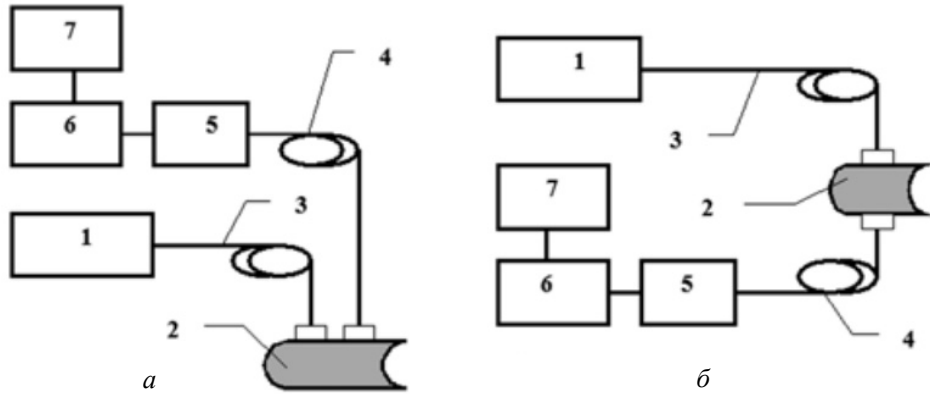


Рис. 1. Реализация методов неинвазивной оптической оксиметрии в отраженном (а) и прошедшем (б) свете [10]

Fig. 1. Implementation of non-invasive optical oximetry methods in the reflected (a) and transmitted (b) light [10]

В статье [9] описывается подход, который реализуется в настоящее время в подавляющем большинстве случаев в разных методах оптической оксиметрии. При моделировании распространения излучения в биоткани среда – чистая кровь – может быть представлена как двухкомпонентная жидкость-раствор, содержащая в себе непоглощающий свет растворитель-основу и только две растворенные в ней основные фракции гемоглобина – оксигенированную фракцию (HbO_2) и восстановленную (Hb), т. е. деоксигенированную. В таком случае для двух разных длин волн λ_1 и λ_2 получается система из двух линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \mu_a(\lambda_1) = \varepsilon_{\text{Hb}}(\lambda_1)C_{\text{Hb}} + \varepsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda_1)C_{\text{HbO}_2}, \\ \mu_a(\lambda_2) = \varepsilon_{\text{Hb}}(\lambda_2)C_{\text{Hb}} + \varepsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda_2)C_{\text{HbO}_2}, \end{cases} \quad (2)$$

где $\mu_a(\lambda_1)$, $\mu_a(\lambda_2)$ – коэффициенты поглощения биоткани на выбранных длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно; $\varepsilon_{\text{Hb}}(\lambda_1)$, $\varepsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda_1)$, $\varepsilon_{\text{Hb}}(\lambda_2)$, $\varepsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda_2)$ – коэффициенты, являющиеся характеристиками того, насколько сильно химическое вещество поглощает свет на заданной длине волны для биохимического компонента среды, а C_{Hb} , C_{HbO_2} – погонная (молярная) концентрация компонента внутри тестируемой области.

Данная система уравнений при экспериментально измеренных $\mu_a(\lambda_1)$ и $\mu_a(\lambda_2)$ и известных из литературы $\varepsilon_{\text{Hb}}(\lambda_i)$ и $\varepsilon_{\text{HbO}_2}(\lambda_i)$ легко решается относительно двух неизвестных концентраций C_{Hb} и C_{HbO_2} . Это позволяет легко найти процент оксигенированной фракции гемоглобина в крови, который соответствует в общем случае функциональной сатурации по формуле (1).

Оптические измерения в пульсоксиметрии, направленные на определение $\mu_a(\lambda_1)$ и $\mu_a(\lambda_2)$ по (2), можно проводить как в отраженном, так и в прошедшем свете (рис. 1). В общем случае в пульсоксиметре излучение от источников света 1 доставляется к обследуемому органу 2 через оптическое волокно 3. С помощью приемного оптического жгута 4 регистрируемые световые потоки доставляются в блок регистрации излучения 5. Этот блок содержит, как правило, оптические фильтры и набор фотоприемников на разные длины волн. Далее полезный электрический сигнал проходит аналоговую обработку (усиление, фильтрацию) в электронном блоке 6, оцифровывается и передается в компьютер 7 для дальнейшей математической обработки (реализации вычислений).

В ряде случаев, как, например, в пульсоксиметрах с пальцевым датчиком-прищепкой, источники излучения (светодиоды) и фотоприемник (фотодиод) располагаются непосредственно на поверхности обследуемого объекта. В этом случае нет нужды в использовании световодов, а жгуты 3 и 4 представляют собой один электрический кабель. По результатам измерений блоком регистрации мощности излучений на разных длинах волн в программном обеспечении прибора реализуется вычисление неизвестных коэффициентов $\mu_a(\lambda_1)$ и $\mu_a(\lambda_2)$, по значениям которых вычисляется SO_2 в тестируемом объеме биоткани [9].

В работе [9] также указывается, что с так называемого эффективного диагностического объема биоткани при оптической оксиметрии «на отражение» (рис. 1, а) регистрируется основной полезный оптический сигнал. Глубина проникновения излучения не влияет на диагностическую ценность полученных данных. Из этого можно сделать вывод, что метод оптической оксиметрии «на отражение» обладает такой же диагностической ценностью, как и метод «на просвет», и поэтому может быть использован для ветеринарных пульсоксиметров без потери в точности измерения пульса и оксигенации крови.

Сейчас существует несколько моделей ветеринарных пульсоксиметров, имеющих один и тот же принцип измерения – фотоплетизмографический на «просвет» с использованием красной и инфракрасной длин волн [11–13]. Конструктивно пульсоксиметры, предназначенные для человека и для животного, не отличаются. Однако если пульсоксиметр PM-60 фирмы Mindray имеет датчик, форма которого анатомически рассчитана только для человека, то модель PM-60vet [14] укомплектована универсальным набором датчиков, который позволяет использовать ее и как ветеринарный пульсоксиметр. Существуют и специальные модели для ветеринарной практики, такие как Storm H100B VET [15], ветеринарный пульсоксиметр UT100 [16], Оху9Vet компании Bionet [17] и другие. Они используют одинаковые способы крепления – прищепками, чаще всего на язык или на губу пациента, но возможно на уши и лапы животного. Имеют дисплей для вывода данных и некоторые могут выводить данные на компьютер. Различаются они используемыми материалами для самого прибора и внутренней электроники, что выражается в разном объеме памяти для хранения записей о параметрах за определенный промежуток времени.

В основном в существующих приборах используется способ «на просвет». Этот метод удобен для проведения измерений у животных, находящихся под наркозом, однако для использования на активно двигающихся животных это проблематично.

Однако, как мы описали выше, метод «на просвет» не имеет никаких особых преимуществ по сравнению с методом «на отражение». Использование же метода «на отражение» позволяет использовать датчик не только во время анестезии, но и на постоянной основе: в послеоперационном периоде или в случае хронических заболеваний в домашних условиях, а не только в условиях стационара.

3. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ УСТРОЙСТВА

Очевидно, что главным элементом нашего прибора будет фотодетектор с излучателями волн, который должен иметь управление. Даже в самом простом случае это должен быть некий микроконтроллер, который также не будет занимать много места на плате. Не стоит забывать про внутренний источник питания.

Для вывода данных было выбрано приложение на телефоне для обеспечения мобильности и возможности управления и мониторинга в любой момент времени. Обычный вариант с дисплеем нам не подходит из-за места размещения, это будет просто неудобно как смотреть, так и управлять. Соответственно на плате должен находиться модуль, принимающий данные извне по сигналу. Самым распространенным сигналом является Bluetooth – его и будем использовать. На плате может находиться модуль Bluetooth, но для экономии места лучше использовать микроконтроллер со встроенным протоколом Bluetooth. На современном рынке микроконтроллеров существует много моделей, реализующих в том числе протокол Bluetooth Low Energy, который потребляет меньше энергии за счет того, что приемопередатчик работает не постоянно, а только во время непосредственно приема / передачи [18].

На основе этих компонентов авторами была выработана структурная схема (рис. 2).

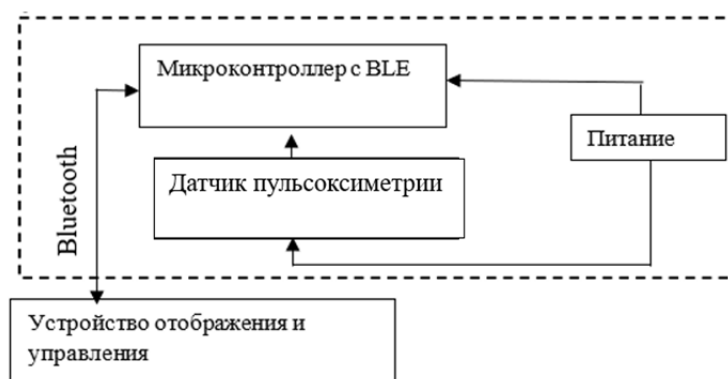


Рис. 2. Структурная схема

Fig. 2. Block diagram

В настоящей работе авторами был выбран датчик пульсоксиметра MAX30102 от компании производителя Maxim Integrated. В него встроены фотоприемник и два источника света: 660 нм (красный) и 940 нм (инфракрасный). Тем самым он обеспечивает пульсоксиметрию посредством метода «на отражение», что нам и нужно. Помимо всего прочего он содержит низковольтную электронику с подавлением внешней засветки. MAX30102 работает от источника питания напряжением 1,8 В. Отдельный источник питания от 3,3 до 5,0 В требуется для излучения встроенных светодиодов. Взаимодействие с внешними устройствами происходит через стандартный интерфейс I2C. Модуль MAX30102 может быть программно переведен в режим ожидания с практически нулевым током потребления (около 0,7 мкА), что позволяет отказаться от выключения питания [19].

На рис. 3 показана схема подключения датчика, в которую входит 4 конденсатора емкостью 10 мкФ; 0,1 мкФ; 4,7 мкФ и 0,1 мкФ, а также 3 резистора с номиналами 1 кОм. Для работы схемы необходимо 2 источника питания: 3,3 В и 1,8 В. Эти сведения понадобятся в дальнейшем при выборе побочных компонентов для разработки схемы.

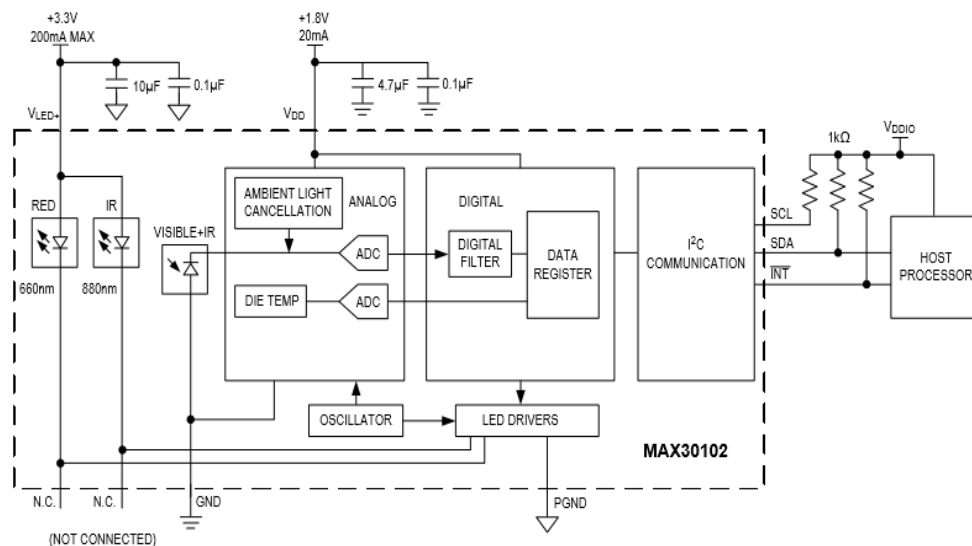


Рис. 3. Схема подключения MAX30102

Fig. 3. MAX30102 connection diagram

Следующим важным компонентом является микроконтроллер, с помощью которого будет производиться запуск работы датчика и передача данных, так как с целью экономии места микроконтроллер желательно снабдить встроенным Bluetooth-приемником / передатчиком. Для этой цели выберем микроконтроллер компании ST Microelectronics под названием BlueNRG-2 [20]. Говоря точнее, данное устройство является не микроконтроллером, а системой на чипе (SoC), что сложнее по своему устройству и производительнее, чем просто микроконтроллер. Но для комфортного восприятия информации обращение «микроконтроллер» к нему сохранится.

Микроконтроллер обладает нужными нам характеристиками: два I2C интерфейса для работы с датчиком, Bluetooth версии 5.0 (самая последняя модель на данное время) и возможность как работать в режиме Master/Slave, так и совмещать эти роли. Напряжение питания от 1,7 до 3,6 В, что соответствует напряжению питания датчика и позволит использовать один источник напряжения в 3,3 В. Программируемая Flash-память на 256 кбайт. Его размеры составляют $6 \times 6 \times 0,85$ мм, что также подходит нашей цели минимизации размера [20]. Схема подключения микроконтроллера изображена на рис. 4.

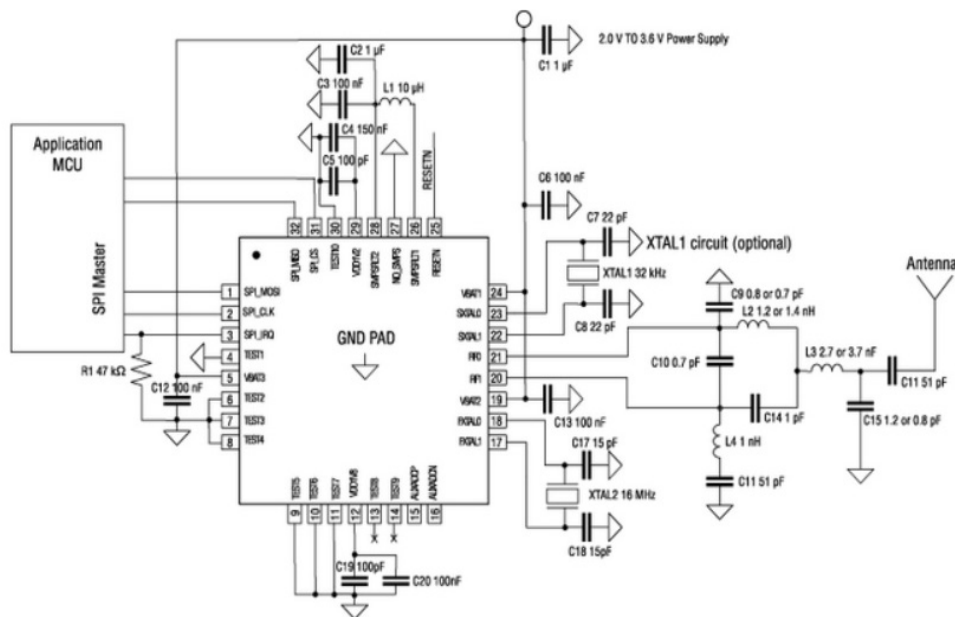


Рис. 4. Схема подключения микроконтроллера

Fig. 4. Microcontroller connection diagram

Так как устройство должно быть переносным, питание от сети не подходит и необходимо использовать компактный источник питания. Выше было сказано, что для питания светодиодов датчика и микроконтроллера необходимо примерно 3,3 В. Такое значение напряжения вполне может обеспечить литиевая батарейка типоразмера CR2032.

Данное напряжение подходит для основного питания, но датчик MAX30102 требует два напряжения питания: 3,3 В и от 1,7 до 2 В для питания самого датчика, поэтому воспользуемся делителем напряжения для уменьшения напряжения или готовой микросхемой преобразователя напряжения, которая даст необходимые 1,7 В.

Принципиальная схема, построенная на данных компонентов в среде Dip Trace, выглядит следующим образом (рис. 5).

Здесь же приведем приблизительную блок-схему программы микроконтроллера для данного прибора (рис. 6).

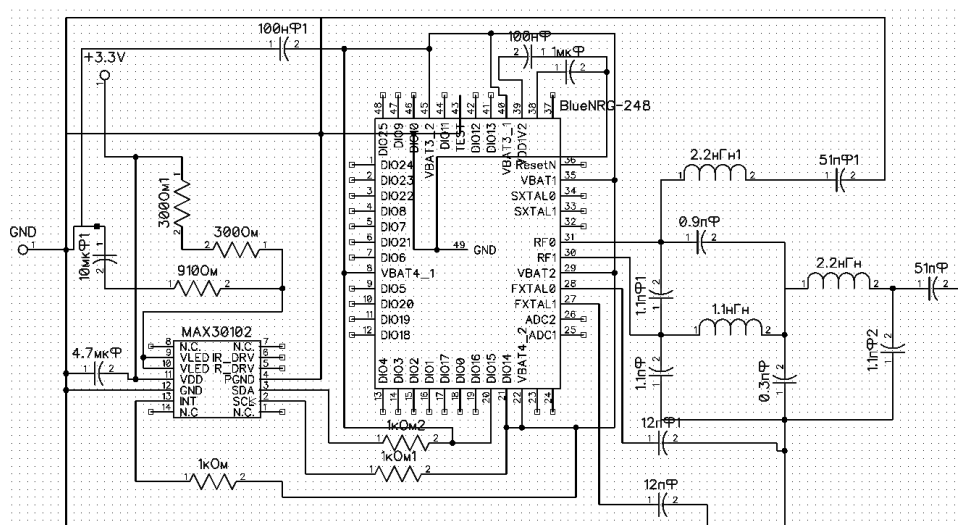


Рис. 5. Принципиальная схема устройства

Fig. 5. Schematic diagram of the device

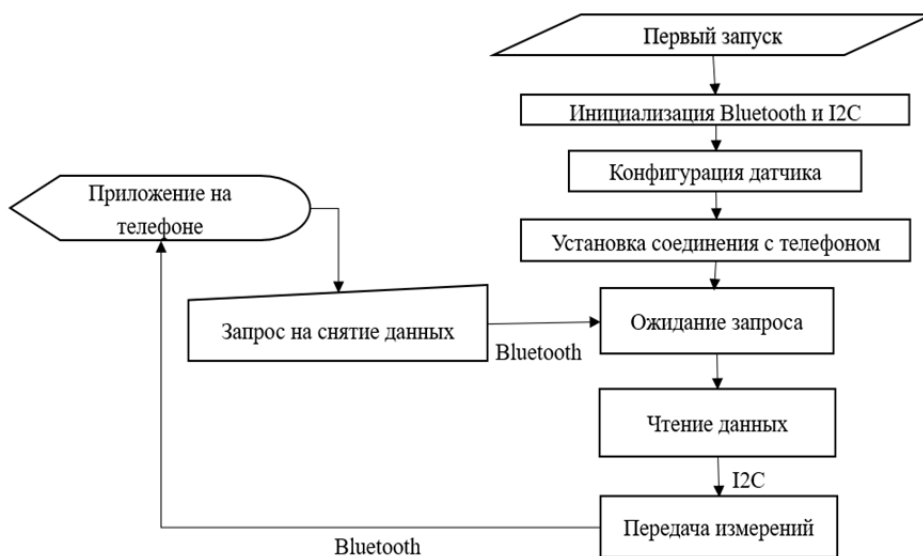


Рис. 6. Блок-схема программы микроконтроллера

Fig. 6. Microcontroller program block diagram

С помощью разобранных выше компонентов и программы теоретически возможно создание пульсоксиметра для животных. Данные компоненты являются примерами того, как можно их использовать для решения поставленной задачи. Вместо них возможно использование любых других компонентов, которые удовлетворяют условиям минимизации размера прибора и точности измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанный программно-аппаратный комплекс для мониторингирования состояния домашнего животного достаточно компактен и имеет несомненные достоинства (удобство, относительная дешевизна) по сравнению с имеющимися на рынке аналогами. Разработка является актуальной перспективой в области ветеринарных устройств для домашнего использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cugmas B., Spigulis J.* Biophotonics in veterinary medicine: the first steps toward clinical translation // *Proceedings SPIE*. – 2019. – Vol. 10885: Optical Diagnostics and Sensing XIX: Toward Point-of-Care Diagnostics, San Francisco, CA (20 February 2019). – DOI: 10.1117/12.2507980.
2. *Elliott M., Baird J.* Pulse oximetry and the enduring neglect of respiratory rate assessment: a commentary on patient surveillance // *British Journal of Nursing*. – 2019. – Vol. 28, N 19. – P. 1256–1259.
3. *Грядунова Ф.А., Сотникова Л.Ф.* Факторы риска возникновения послеоперационных осложнений у собак, подвергшихся хирургическому лечению под общей анестезией // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2020. – № 6 (188). – С. 114–124.
4. *Bardell D., Mosing M., Cripps P.J.* Restoration of arterial oxygen tension in horses recovering from general anaesthesia // *Equine Veterinary Journal*. – 2020. – Vol. 52. – P. 187–193. – DOI: 10.1111/evj.13142.
5. *Mirza U., Farooq U.B.* Technological advancements in veterinary medicine // *International Journal of Science, Environment and Technology*. – 2020. – Vol. 9, N 4. – P. 543–547.
6. Evaluation of the reliability of pulse oximetry, at different attachment sites, to detect hypoxaemia in immobilized impala (*Aepyceros melampus*) / T.K. Mtetwa, G.E. Zeiler, L. Laubscher, S. Pfitzer, L.C.R. Meyer // *Veterinary Anaesthesia and Analgesia*. – 2020. – Vol. 47. – P. 323–333. – DOI: 10.1016/j.vaa.2019.08.051.
7. *Auckburally A.* Pulse oximetry and oxygenation assessment in small animal practice // *In Practice*. – 2016. – Vol. 38. – P. 50–58.
8. Development and clinical evaluation of a new sensor design for buccal pulse oximetry in horses / J.K. Reiners W. Rossdeutscher K. Hopster S.B.R. Kästner // *Equine Veterinary Journal*. – 2018. – Vol. 50. – P. 228–234. – DOI: 10.1111/evj.12744.
9. *Рогаткин Д.А.* Физические основы оптической оксиметрии // *Медицинская физика*. – 2012. – № 2. – С. 97–114.
10. *Рогаткин Д.А., Лапаева Л.Г.* Перспективы развития неинвазивной спектрофотометрической диагностики в медицине // *Медицинская техника*. – 2003. – № 4. – С. 31–36.
11. *Васютина М.Л., Печникова Н.А., Торопова Я.Г.* Методы визуализации и анализа состояния микроциркуляторного русла в ветеринарной и экспериментальной практике // *Лабораторные животные для научных исследований*. – 2019. – № 2. – DOI: 10.29296/2618723X-2019-02-07.
12. *Thawley V., Waddell L.S.* Pulse oximetry and capnometry // *Topics in Companion Animal Medicine*. – 2013. – Vol. 28, iss. 3. – P. 124–128. – DOI: 10.1053/j.tcam.2013.06.006.
13. Appraisal of the ‘penumbra effect’ using lingual pulse oximetry in anaesthetized dogs and cats / A. Mair, J. Ferreira, C. Ricco, M. Nitzan // *Veterinary Anaesthesia and Analgesia*. – 2020. – Vol. 47. – P. 177–182. – DOI: 10.1016/j.vaa.2019.08.050.
14. PM-60Vet. Ветеринарный пульсоксиметр / Mindray. – URL: <https://www.mindray.com/ru/product/PM-60.html> (дата обращения: 15.12.2020).
15. Ветеринарный пульсоксиметр Storm H100B VET / Dixon. – URL: <https://dixon.ru/goods/veterinarnyy-pulsoksimetr-storm-h-100-b-vet.html> (дата обращения: 15.12.2020).
16. Ветеринарный пульсоксиметр UT100. Руководство пользователя / ЗАО «Ист Медикал». – URL: <https://www.zoomed.ru/upload/medialibrary/af2/af2ddf599628eacc2b25a3db58847612.pdf> (дата обращения: 15.12.2020).
17. Oxy9wave vet – veterinary pulse oximeter / Bionet. – URL: <https://www.bionetus.com/oxy9wave-vet-veterinary-pulse-oximeter/> (accessed: 15.12.2020).

18. Асмаков С. Интерфейс Bluetooth: справочник пользователя // Компьютер Пресс. – 2011. – № 7. – С. 56–60.
19. MAX30102. High-sensitivity pulse oximeter and heart-rate sensor for wearable health. – URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX30102.pdf> (accessed: 15.12.2020).
20. Datasheet BlueNRG-2. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/992/DOC003992999.pdf> (accessed: 15.12.2020).

Педонова Зоя Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры ССОД Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследования и разработка биомедицинских приборов и систем. Имеет более 20 публикаций. E-mail: pedonovaz@gmail.com

Кривоногова Дарья Александровна, магистрант кафедры ССОД Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследования и разработка биомедицинских приборов и систем. Имеет 3 публикации. E-mail: krivdah@gmail.com.

Pedonova Zoya N., associate professor at Novosibirsk State Technical University. The main field of her scientific research is research and development of biomedical devices and systems. She has more than 20 publications. E-mail: pedonovaz@gmail.com

Krivonogova Daria A., master student at the department of SSOD of Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is design of medical equipment. She has 3 publications. E-mail: krivdah@gmail.com

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-81-92

Design and research on a software and hardware complex for monitoring the condition of a pet^{*}

D.A. KRIVONOGOVA^a, Z.N. PEDONOVA^b

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a krivdah@gmail.com ^b pedonovaz@gmail.com

Abstract

This article analyzes the current state and a potential use of pulseoximeters in veterinary medicine. Promising optical methods such as optical coherence tomography, pulseoximeter, and hyperspectral imaging have been clinically introduced into human medicine. But even though human and small animal medicine shares a personalized modern approach, biophotonics is still rarely used in veterinary medicine. Pulseoximeters are most often used when monitoring the condition of an animal during general anesthesia.

Prospective optical devices for small animals, such as dogs and cats, should be reliable and resistant to damage (for example, due to bites or chewing), offering convenient and short measurements. The potential of using pulseoximeters for pet monitoring has yet to be explored.

In this paper, we considered two methods of measurement, namely lumen oximetry and reflection oximetry. Based on the literature sources, we can conclude that the method of optical reflection oximetry has the same diagnostic value as the method of lumen oximetry and therefore can be used for veterinary pulseoximeters without losing the accuracy of pulse measurement and blood oxygenation.

^{*} Received 22 July 2020.

According to the results of the existing devices review, it was found that they mainly use the lumen oximetry method. This method is convenient for performing measurements in animals under anesthesia, but it is problematic for use on actively moving animals.

The purpose of this work is to develop a new model of pulseoximeter for animals. A new type of the device based on an earlier unused method is proposed, and its advantages and disadvantages are described. Components for creation are proposed and a scheme based on these components is constructed.

Keywords: heart rate, oximetry, pets, photoplethysmography, pulseoximeter, diagnostics, monitoring, saturation

REFERENCES

1. Cugmas B., Spīgulis J. Biophotonics in veterinary medicine: the first steps toward clinical translation. *Proceedings SPIE*, 2019, vol. 10885: Optical Diagnostics and Sensing XIX: Toward Point-of-Care Diagnostics, San Francisco, CA (20 February 2019). DOI: 10.1117/12.2507980.
2. Elliott M., Baird J. Pulse oximetry and the enduring neglect of respiratory rate assessment: a commentary on patient surveillance. *British Journal of Nursing*, 2019, vol. 28, no. 19, pp. 1256–1259.
3. Gryadunova F.A., Sotnikova L.F. Faktory riska vozniknoveniya posleoperatsionnykh oslozhenii u sobak, podvergshikhsya khirurgicheskomu lecheniyu pod obshchei anesteziei [The risk factors for postoperative complications in dogs that undergone surgery under general anesthesia]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2020, no. 6 (188), pp. 114–124.
4. Bardell D., Mosing M., Cripps P.J. Restoration of arterial oxygen tension in horses recovering from general anaesthesia. *Equine Veterinary Journal*, 2020, vol. 52, pp. 187–193. DOI: 10.1111/evj.13142.
5. Mirza U., Farooq U.B. Technological advancements in veterinary medicine. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 2020, vol. 9, no. 4, pp. 543–547.
6. Mtetwa T.K., Zeiler G.E., Laubscher L., Pfitzer S., Meyer L.C.R. Evaluation of the reliability of pulse oximetry, at different attachment sites, to detect hypoxaemia in immobilized impala (*Aepyceros melampus*). *Veterinary Anaesthesia and Analgesia*, 2020, vol. 47, pp. 323–333. DOI: 10.1016/j.vaa.2019.08.051.
7. Auckburally A. Pulse oximetry and oxygenation assessment in small animal practice. *In Practice*, 2016, vol. 38, pp. 50–58.
8. Reiners J.K., Rossdeutscher W., Hopster K., Kästner S.B.R. Development and clinical evaluation of a new sensor design for buccal pulse oximetry in horses. *Equine Veterinary Journal*, 2018, vol. 50, pp. 228–234. DOI: 10.1111/evj.12744.
9. Rogatkin D.A. Fizicheskie osnovy opticheskoi oksimetrii [Physical foundations of optical oximetry]. *Meditsinskaya fizika = Medical Physics*, 2012, no. 2, pp. 97–114.
10. Rogatkin D.A., Lapaeva L.G. Perspektivy razvitiya neinvazivnoi spektrofotometricheskoi diagnostiki v meditsine [Prospects for development of noninvasive spectrophotometric medical diagnosis]. *Meditsinskaya tekhnika = Biomedical Engineering*, 2003, no. 4, pp. 31–36. (In Russian).
11. Vasyutina M.L., Pechnikova N.A., Toropova Ya.G. Metody vizualizatsii i analiza sostoyaniya mikrotsirkulyatornogo rusla v veterinarnoi i eksperimental'noi praktike [Methods of visualization and analysis of the microcirculatory state in veterinary and experimental practices]. *Laboratornye zhivotnye dlya nauchnykh issledovaniy = Laboratory Animals for Science*, 2019, no. 2. DOI: 10.29296/2618723X-2019-02-07.
12. Thawley V., Waddell L.S. Pulse oximetry and capnometry. *Topics in Companion Animal Medicine*, 2013, vol. 28, iss. 3, pp. 124–128. DOI: 10.1053/j.tcam.2013.06.006.
13. Mair A., Ferreira J., Ricco C., Nitzan M. Appraisal of the ‘penumbra effect’ using lingual pulse oximetry in anaesthetized dogs and cats. *Veterinary Anaesthesia and Analgesia*, 2020, vol. 47, pp. 177–182. DOI: 10.1016/j.vaa.2019.08.050.
14. PM-60Vet. *Veterinary pulse oximeter*. Mindray. (In Russian). Available at: <https://www.mindray.com/ru/product/PM-60.html> (accessed 15.12.2020).
15. *Veterinary pulse oximeter Storm H100B VET*. Dixon. (In Russian). Available at: <https://dixon.ru/goods/veterinarnyy-pulsoksimetr-storm-h-100-b-vet.html> (accessed 15.12.2020).

16. *Veterinary pulse oximeter UT100. User guide*. CJSC "East Medical". (In Russian). Available at: <https://www.zoomed.ru/upload/medialibrary/af2/af2ddf599628eacc2b25a3db58847612.pdf> (accessed 15.12.2020).
17. *Oxy9Wave Vet – veterinary pulse oximeter*. Bionet. Available at: <https://www.bionet.us.com/oxy9wave-vet-veterinary-pulse-oximeter/> (accessed 15.12.2020).
18. Asmakov S. Interfeis Bluetooth: spravochnik pol'zovatelya [Bluetooth interface: user's guide]. *Komp'yuter Press = Computer Press*, 2011, no. 7, pp. 56–60. (In Russian).
19. *MAX30102. High-sensitivity pulse oximeter and heart-rate sensor for wearable health*. Available at: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX30102.pdf> (accessed 15.12.2020).
20. *Datasheet BlueNRG-2*. Available at: <https://static.chipdip.ru/lib/992/DOC003992999.pdf> (accessed 15.12.2020).

Для цитирования:

Кривоногова Д.А., Педонова З.Н. Разработка и исследование программно-аппаратного комплекса для мониторингирования состояния домашнего животного // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 4 (80). – С. 81–92. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-81-92.

For citation:

Krivosnogova D.A., Pedonova Z.N. Razrabotka i issledovanie programmno-apparatnogo kompleksa dlya monitorirovaniya sostoyaniya domashnego zhivotnogo [Design and research on a software and hardware complex for monitoring the condition of a pet]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (80), pp. 81–92. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-81-92.