

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ВЕСТИБУЛЯРНОГО АППАРАТА ПАЦИЕНТА

И.В. Дубойский, Н.А. Павлюк, Р.Н. Яковлев

Представлено оригинальное устройство для диагностики вестибулярного аппарата пациента, состоящее из тензорезистивного датчика, управляющей платы и микроконтроллера. Датчик давления разработан на основе электропроводящего материала Velostat, который изменяет свое сопротивление при нажатии и сгибании, тем самым позволяя регистрировать изменение давления стопы пациента на активную поверхность. За счет визуализации результатов работы устройства оно может быть использовано как дополнительная система для диагностики вестибулярного аппарата пациента.

Ключевые слова: датчик давления, давление стопы, подоскоп, диагностика вестибулярного аппарата, функция равновесия.

Расстройство функции равновесия (атаксия) является весьма серьезной проблемой для больных с головокружением, поскольку пациенты нередко оказываются неспособными передвигаться без посторонней помощи даже в пределах собственного жилища. Поэтому при оценке состояния вестибулярной функции организма большое внимание уделяется исследованию способности человека поддерживать вертикальное положение тела – функции равновесия, осуществляющейся посредством установочных рефлексов, которые удерживают центр тяжести тела в пределах проекции площади его опоры.

Проблема эффективного лечения вестибулярных нарушений является актуальной в течение многих лет. Существующие методы лечения нарушений равновесия не во всех случаях удовлетворяют больного и врача. Принцип индивидуального для каждого больного плана лечения, который зависит от патогенеза, этиологии, сроков начала лечения, позволяет добиться успеха в лечении больных с вестибулярными нарушениями. В связи с этим актуальными являются разработки в области бюджетных устройств диагностики вестибулярного аппарата на основе «умной» электроники, в частности, сенсорной платформы, на которую пациент мог бы встать, а врач имел возможность регистрировать изменение положения стопы, например, при проведении пробы Ромберга [1, 2] или аналогичных тестов.

1. Разработка функциональной и структурной схем устройства

Структурная схема устройства приведена на рис. 1. Устройство состоит из 3 основных блоков, между которыми происходит обмен данными: блок программного обеспечения, блок управления, чувствительный элемент (датчик). Блок управления в свою очередь состоит из аппаратной платформы Arduino Uno (на базе микроконтроллера ATmega328) и управляющей платы.

Обмен данными происходит следующим образом: сначала при помощи Arduino IDE программа загружается через COM-порт во flash-память микроконтроллера ATmega328. После загрузки программы микроконтроллер начинает выполнять инструкции, заложенные в этой программе.

Функциональная схема устройства, отражающая последовательное выполнение команд в устройстве, представлена на рис. 2. Управляющая программа записана в память микроконтроллера, который в свою очередь обрабатывает эти инструкции. Для считывания данных с датчика на него подается напряжение 5 В на одну дорожку за каждую итерацию отработки программы. В момент, когда пациент встает на датчик система регистрирует место и силу нажатия на него. Эти значения пересылаются с помощью управляющей платы с датчика в микроконтроллер, а от него в программу визуализации для отображения информации на экране.

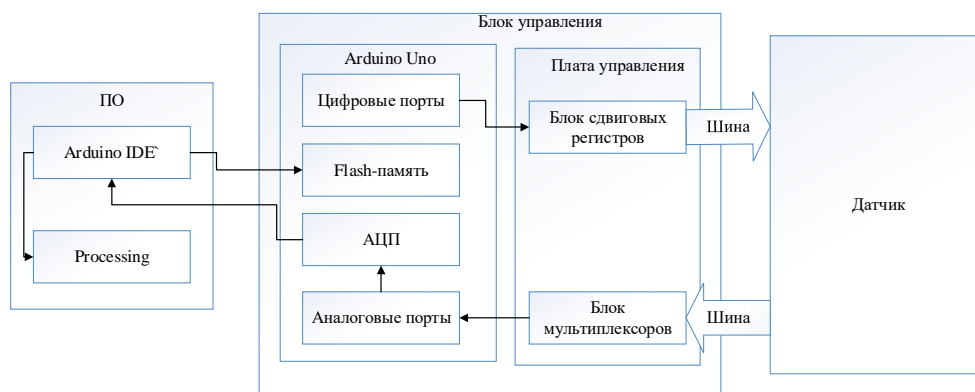


Рис. 1. Структурная схема устройства для диагностики аппарата пациента

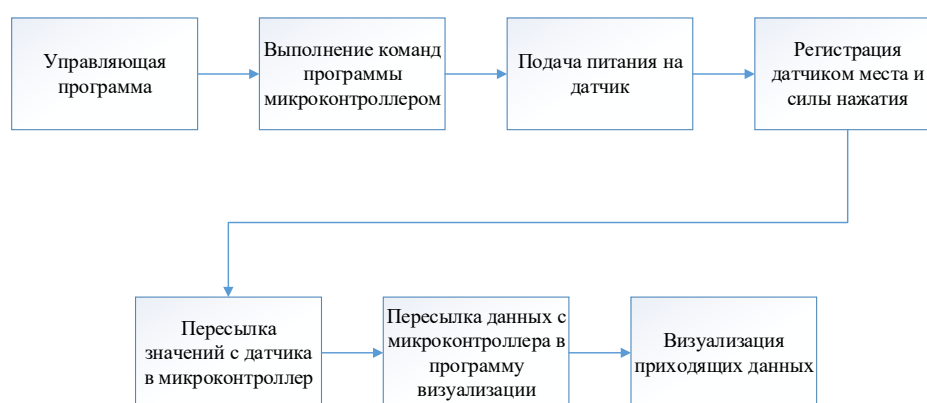


Рис. 2. Функциональная схема устройства

Разберем одну итерацию циклической работы микроконтроллера. Через цифровые порты настраиваются сдвиговые регистры, мультиплексоры и их порядок работы. На одну из медных дорожек (вертикальный слой), через шину данных для сдвиговых регистров, поступает напряжение 5 В. Если на этом участке происходит нажатие на чувствительный элемент, то сопротивление Velostat начинает уменьшаться, следовательно, это приводит к тому, что на горизонтальный слой начинает поступать напряжение, зависящее от силы давления на датчик (чем больше сила давления, тем больше тока начинает пропускаться через матрицу). Это напряжение начинает поступать через шину мультиплексора на один из его входов, и в случае, если этот вход коммутирует с выходом, это напряжение поступает на аналоговый порт Arduino Uno, а затем во встроенный АЦП, имеющий разрешение 10 бит (1024 значения). Прохождение цикла осуществляется до тех пор, пока не будут считаны все значения с датчика. Программа, загруженная в Arduino IDE, записывает эти данные в одномерный массив и передает его в программную среду Processing (скорость 115200 бод) [3], которая отвечает за визуализацию данных. На экране компьютера отображается информация, после чего происходит завершение итерации.

2. Разработка принципиальной схемы платы управления

В ходе выполнения работы была спроектирована принципиальная схема платы управления. Для подачи питания на каждую из дорожек датчика используется сдвиговый регистр 74НС595 [4]. Микросхема преобразовывает входящий последовательный сигнал на 1 пине (Ds) в выходной параллельный на 8 пинах (Qx). Последовательная передача синхронна: для такта используется пин (SHcp). Также отдельным пином управляется регистр данных (STcp), что позволяет изменять сигнал на 8 выходах единовре-

менно, когда все данные переданы. Пины Q0-Q7 подключены к датчику, MR, VCC – к питанию 5 В. Вывод Ds подключен к 13 пину Arduino, вывод SHcp к 11, STcp к 12. Вывод Q7S первого регистра соединен с выводом Ds второго для увеличения разрядности до 16 бит. OE, GND к земле.

К Arduino подключены четыре мультиплексора. Мультиплексор необходим для расширения возможности подключения выводов от датчика к аналоговым пинам Arduino [5]. Так как аналоговых пинов всего 6, а выводов от датчика 30, нам необходимо применить мультиплексор, тогда на один аналоговый пин будет приходиться 8 контактов от датчика. Выходы четырех мультиплексоров подключены к аналоговым пинам Arduino A₀ A₁ A₂ A₃ соответственно. Входы 0-7 всех мультиплексоров соединены с датчиком. Между выводами датчика и входами мультиплексора расположены стягивающие резисторы номиналом 10 кОм, которые необходимы для того, чтобы не оставлять выход в «подвешенном» состоянии. Кроме того, стягивающий резистор применяется с целью избежания появления шумов. В данном случае, при разомкнутой цепи, нежелательный ток будет уходить через резистор на землю, а в моменты, когда цепь замкнута, большое сопротивление резистора не даст большей части тока идти на землю: сигнал пойдет к входному контакту. В случае, если сопротивление резистора будет малым (единицы Ом), при замкнутой цепи произойдет короткое замыкание.

3. Выбор аппаратной платформы и электронных компонентов

3.1 Выбор микроконтроллерной платы

Главные требования, предъявляемые к микроконтроллерной плате: простота в работе, набор встроенных библиотек от разработчиков, наличие встроенного АЦП и доступная ценовая категория. После просмотра доступных решений для рассмотрения было выбрано 3 аппаратных платформы.

Первая платформа называется MSP430 LaunchPad, она построена на базе 16-битных микроконтроллеров семейства MSP430G2x с тактовой частотой 16 МГц. Макетная плата снабжена сокетом DIP-20 и поставляется в наборе с двумя микроконтроллерами серии MSP430G2x. Чипы отличаются друг от друга количеством памяти, числом выводов и набором последовательных портов.

Вторая платформа – на базе микроконтроллера STM32F100RBT6B, предназначена для изучения возможностей микроконтроллеров семейства STM32 Value Line. Плата имеет коннектор расширения для изучения работы периферии микроконтроллера и подключения к макетным платам. Для внутрисхемного программирования и отладки на плате предусмотрен отладчик/программатор ST-Link, который может использоваться для отладки собственных устройств.

Общим недостатком данных вариантов является высокая цена [6], поэтому в данной работе используется более дешевый аналог Arduino Uno, который базируется на 8-битном микроконтроллере Atmel ATmega328 и программируется при помощи языка C. Платформа имеет 14 цифровых пинов, 6 из которых могут применяться для широтно-импульсной модуляции. Каждый из 14 цифровых пинов микроконтроллера может быть настроен как вход или выход, используя специальные функции в программе. Пины обладают 5 В логикой, каждый из них имеет нагрузочный резистор 20-50 кОм и может пропускать до 40 мА, но по умолчанию они отключены. Также имеется кварцевый генератор с частотой 16 МГц.

3.2 Выбор элементной базы

Для подачи питания на каждую из дорожек датчика поочередно был использован сдвиговый регистр 75HC595. Питание необходимо подавать одновременно только на одну дорожку датчика, затем переключать на следующую до тех пор, пока питание не поступит на последнюю дорожку. В датчике 14 дорожек, на которые подается питание, но с помощью микросхемы 74HC595, будет задействовано всего 3 пина Arduino Uno, сколько бы сдвиговых регистров мы не подключали последовательно, увеличивая количество бит [7].

Для реализации устройства также необходим мультиплексор CD4051BE (технология КМОП) [8]. Его использование требуется для расширения возможности подключения выводов от датчика к аналоговым пинам Arduino. Так как аналоговых пинов всего 6, а выводов от датчика 30, нам необходимо применить мультиплексор, тогда на один аналоговый пин будет приходиться 8 контактов от датчика.

4. Изготовление датчика давления

Для изготовления датчика необходимы внешние стенки, которые будут защищать датчик от различных деформаций и изношенности. С этой целью был использован материал неопрен [9], представляющий собой синтетический хлоропреновый каучук, который имеет достаточно большую упругость и эластичность, и обладает диэлектрическими свойствами.

Для детектирования давления стопы пациента использовался электропроводящий материал Velostat, особенностью которого является чувствительность к нажатию или сгибанию [10]. При совершении данных действий уменьшается его электрическое сопротивление в активной области. Velostat подходит для работы с гибкими сенсорными системами. Материал применяется при температуре от -45°C до $+65^{\circ}\text{C}$ и подходит для расположения на неровных поверхностях. Velostat обладает достаточной чувствительностью для регистрации изменения положения стоп человека.

Разработанный датчик состоит из трех слоев. На внешние слои нанесены медные дорожки, между которыми расположен двусторонний скотч для скрепления слоев, также скотч служит диэлектриком между соседними медными дорожками. На одном слое дорожки расположены вертикально, на другом горизонтально.

Именно на эти медные дорожки запаяны шины [11]. Одна шина идет от блока сдвиговых регистров на дорожки, расположенные вертикально (нумерация от 1 до 14). Шина получилась 14 разрядной, поэтому потребуется 2 сдвиговых регистра. Вторая шина идет от блока мультиплексоров до дорожки, расположенной горизонтально (нумерация от 15 до 44). Шина получилась 30 разрядной, поэтому потребуется 4 мультиплексора. Между шинами располагается материал Velostat. Общий вид структуры датчика показан на рис. 3.



Рис. 3. Структура датчика, расположенного послойно

На одну из медных токопроводящих дорожек, расположенную на внешнем слое, при помощи сдвигового регистра подается напряжение 5 В. В зависимости от приложенной силы давления, Velostat изменяет свое сопротивление. На другой внешний слой также нанесены медные дорожки, через которые проходит ток напряжением от 0 В (сильное нажатие) до 5 В (нажатия нет). Далее с помощью мультиплексора этот ток поступает на аналоговый пин Arduino, который оцифровывает это значение от 0 до 1023 условных единиц. Размер разработанного датчика составляет 15 на 30 см.

5. Разработка программного обеспечения

Для написания программы управления микроконтроллером была использована программная среда Arduino IDE версии 1.8.4, которая работает следующим образом: сначала инициализируются все необходимые переменные для выводов мультиплексоров и сдвиговых регистров и конфигурируются режимы работы выводов Arduino. Далее выполняются две основные функции. `shiftRegistersConfigure` и `readDataFromMultiplexer`. С помощью первой функции поочередно на каждую медную дорожку, которые расположены вертикально, подается напряжение 5 В. Вторая функция считывает значения с датчика через мультиплексоры и записывает их в массив. Далее этот массив передается по com порту в программу визуализации Processing [12].

Для передачи был использован формат JSON, который позволяет передать весь массив одной строкой. В этом формате каждое значение или массив должен иметь свой индивидуальный ключ-привязку. В Processing происходит прием и визуализация этого массива: изменение цвета того участка датчика, на который оказывают давление, от синего (слабое нажатие) до красного (сильное нажатие) [13].

6. Проверка на работоспособность устройства

Внешний вид устройства показан на рис. 4, а.

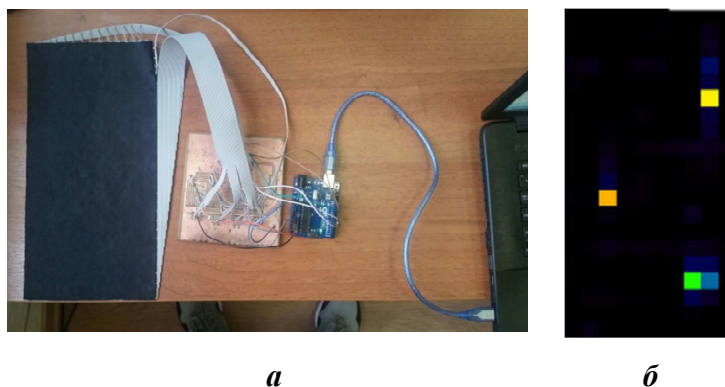


Рис. 4. Внешний вид устройства (а); проверка датчика на работоспособность с приложением трех точечных предметов (б)

Как видно из рис. 4, б, разрешение получилась не таким большим. Данный недостаток можно исправить путем уменьшения ширины медных проводников, но не менее 2,5 мм, иначе ток начнет задевать соседние медные проводники. Также разрешение можно повысить путем увеличения количества медных проводников. С помощью этих двух факторов мы можем увеличить разрешение датчика и получить большее количество значений для визуализации данных.

7. Экспериментальное исследование устройства

В первую очередь, врач запускает программу визуализации для того, чтобы произвести оценку нарушений координации движений пациента или оценить степень алкогольного опьянения, затем пациент встает на датчик и дотрагивается указательным пальцем до кончика носа с открытыми или закрытыми глазами. Также можно проводить диагностику в совокупности с указательной пробой, пробой Ромберга или стоянии на одной ноге. Любое изменение равновесия, даже самое незначительное, которое врач может не заметить, отразится в программе, что позволит поставить более точный диагноз. Пример ровного положения ступни человека на датчике приведен на рис. 5, а.

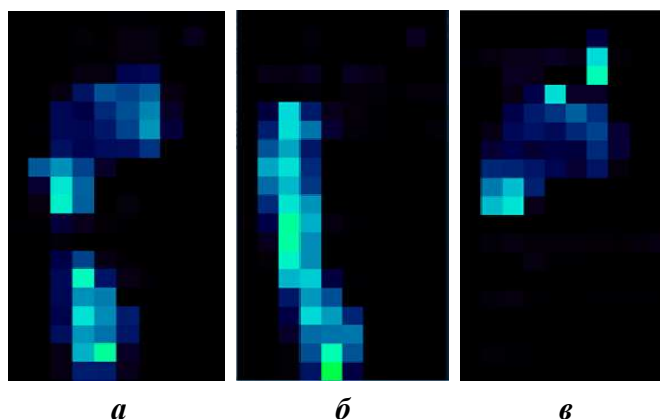


Рис. 5. Результат работы программы визуализации: пример ровного положения ступни человека на датчике (а); изменение положения ступни пациента влево (б); изменение положения ступни пациента вперед (в)

Теперь рассмотрим, как отображаются изменения равновесия пациента в программе. Рис. 5, б показывает изменение равновесия (положения стопы) пациента в левую сторону. Из рисунка видно явную разницу между нормальным положением стопы на датчике и явным завалом пациента в сторону. Также на датчике можно наблюдать не только явные изменения положения стопы, но и малейшие, так как данные поступают в режиме реального времени. Теперь рассмотрим изменения равновесия пациента вперед (рис. 5, в). Изменения также явно заметны по отношению к нормальному положению стопы на датчике.

Таким образом, можно сказать, что цели данной работы были достигнуты. Устройство имеет достаточное разрешение для визуализации данных о положении стопы, по которым можно судить о норме или нарушениях физиологии человека. Совокупность устройства и различных тестов может позволить врачу с большей вероятностью поставить корректный диагноз, так как визуально врач не всегда может зафиксировать малейшие изменения равновесия, что приводит к ошибкам при оценке состояния пациента.

Выводы

В работе представлено оригинальное устройство диагностики вестибулярного аппарата (которое может использоваться совместно со стандартными методиками медицинских исследований), состоящее из датчика на основе резистивного материала Velostat, управляющей платы и микроконтроллера для управления исполнительной программой. Проведенное исследование показало, что разработанный датчик может быть использован как дополнительное устройство при оценке вестибулярного аппарата пациента. Полученные показания позволяют оценить давление стопы человека на поверхность в определенные моменты времени. Дальнейшие исследования будут направлены на интеграцию устройства в другие системы диагностики пациента для мультиплексирования данных с них и осуществления комплексной оценки состояния испытуемого.

Исследование выполнено при поддержке Федерального агентства научных организаций (№ АААА-А16-116033110095-0).

Список литературы

1. Nguyen N., Phan D., Pathirana P.N., Horne M., Power L., Szmulewicz D. Quantification of Axial Abnormality Due to Cerebellar Ataxia with Inertial Measurements // *Sensors*, 2018. № 18(9). 2791. doi.org/10.3390/s18092791.
2. Adelsberger R., Straumann D., Tröster G. Automated Romberg Testing in Patients With Benign Paroxysmal Positional Vertigo and Healthy Subjects. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*; 2015. № 62(1). P. 373 – 381. DOI: 10.1109/TBME.2014.2354053.
3. Processing и Arduino – основы. [Электронный ресурс] URL: <http://arduino-diy.com/arduino-processing-osnovi>. (дата обращения: 26.09.2018).
4. Serial to Parallel Shifting-Out with a 74HC595. [Электронный ресурс] URL: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/ShiftOut>. (дата обращения: 26.09.2018).
5. Emir. Use Multiplexer With Arduino // Cityos Foundation. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://cityos.io/tutorial/1958/Use-multiplexer-with-Arduino>. (дата обращения: 26.09.2018).
6. Cameron C. Yoga Mat-Size Pressure Sensor Matrix Uses LattePanda and Velostat to Save Money 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.hackster.io/yoga-mat-size-pressure-sensor-matrix-uses-lattepanda-and-velostat-to-save-money-49ee86950e5a>. (дата обращения: 26.09.2018).
7. Техническая документация на микросхему 74HC595 // Texas Instruments Incorporated. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc595.pdf>. (дата обращения: 26.09.2018).

8. Техническая документация на микросхему CD4051BE // Texas Instruments Incorporated. 2006. [Электронный ресурс]. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/204/DOC000204382.pdf>. (дата обращения: 26.09.2018).
9. Neoprene Pressure Sensor // КОБАКАНТ. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kobakant.at/DIY/?p=65>. (дата обращения: 26.09.2018).
10. Evelyn R. Pressure Sensor Experiments // Costumes & Sensors. 2016. [Электронный ресурс] URL: <https://www.uni-weimar.de/projekte/costumes-and-sensors/pressure-sensor-experiments/>. (дата обращения: 26.09.2018).
11. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: монография / 7-е изд., пер. с англ. Б.Н. Бронина, А.И. Коротова, М.Н. Микшиса, Л.В. Поспелова, О.А. Соболевой, Ю.В. Чечеткина. М.: Бином, 2015. 704 с.
12. Климов А. Связываемся с Processing // Сайт Александра Климова. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://developer.alexanderklimov.ru/arduino/processing.php>. (дата обращения: 26.09.2018).
13. Doore K. HSB Color-Slider Example // CS1335 Documentation. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://cs1335-documentation.readthedocs.io/en/latest/hsbSlider.html>. (дата обращения: 26.09.2018).

Дубойский Илья Валерьевич, магистрант, acreedr@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,

Павлюк Никита Андреевич, научный сотрудник, antei.hasgard@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской Академии Наук,

Яковлев Роман Никитич, младший научный сотрудник, iakovlev.r@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской Академии Наук

DEVICE FOR DIAGNOSTICS OF THE PATIENT'S VESTIBULAR APPARATUS

I.V. Dubovsky, N.A. Pavliuk, R.N Iakovlev

An original device for diagnostics of the patient's vestibular apparatus is discussed. It consists of a strain gage sensor, a control board and a microcontroller. The pressure sensor is designed on the basis of the Velostat material, which changes its resistance when pressed and bent, thereby allowing the patient's foot pressure to be recorded on the active surface. By visualizing the results of the device's work, it can be used as an additional system to diagnose the patient's vestibular apparatus.

Key words: pressure sensor, foot pressure, podoscope, vestibular apparatus diagnostics, equilibrium.

Dubovsky Ilya Valeryevich, postgraduate, acreedr@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,

Pavliuk Nikita Andreevich, researcher, antei.hasgard@gmail.com, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,

Iakovlev Roman Nikitich, junior researcher, iakovlev.r@mail.ru, Russia, St. Petersburg, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences