Разработка прототипа IoT-устройства для неинвазивного измерения частоты дыхания лабораторных животных в доклинических испытаниях

Ю. Р. Глущик

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

juliaglushchik@mail.ru

Аннотация. **В работе рассматривается разработка прототипа IoT-устройства для неинвазивного измерения частоты дыхания лабораторных животных в доклинических испытаниях на основе использования емкостного датчика прикосновения. Представлено описание аппаратной части устройства, его компонентов и их связь, а также алгоритм измерений с использованием разработанного устройства.**

Ключевые слова: частота дыхания; прототип устройства; сенсорный датчик; микроконтроллер

I. Введение

В современной медицине проведение доклинических испытаний играет критическую роль в разработке новых лекарственный препаратов и устройств. Основными участниками доклинических испытаний являются лабораторные животные, физиология и генетика которых частично схожа с человеческой, что позволяет прогнозировать реакцию организма на тестируемые препараты.

Частота дыхания (ЧД) является одним из основных и важнейших физиологических параметров, отражающих общее состояние организма и функционирование дыхательной, сердечно-сосудистой и нервной систем.

На данный момент не существует единой методики проведения измерения частоты дыхания лабораторных животных с помощью каких-либо специализированных устройств, наиболее распространенным же методом является ручной подсчет дыхательных движений, характеризующийся высоким влиянием фактора субъективности на точность измерений. В связи с этим актуальна задача создания удобного и простого в использовании устройства для проведения измерений, а также методики его эксплуатации для адаптации экспериментальной деятельности к современным условиям.

Основное внимание при разработке данного устройства уделяется неинвазивности используемого метода измерений, а также простоте и эффективности используемых в аппаратной части устройства компонентов. Также важной особенностью разработки является наглядное использование современных технологий моделирования для облегчения и ускорения процесса проектирования.

Использование данного устройства позволит облегчить исследователям процесс проведения измерений, а также снизить фактор субъективности, отрицательно влияющий на точность и достоверность измерений. Разработанное устройство будет использоваться в ходе проведения экспериментальных измерений в лабораториях, занимающихся доклиническими испытаниями препаратов медицинского назначения.

II. Описание аппаратной части

При разработке устройства стояла задача выбора датчика, способного фиксировать дыхательные движения лабораторного животного (мыши) с достаточной скоростью, а также неинвазивным методом.

Значение частоты дыхания лабораторной мыши составляет в среднем 200-280 раз в минуту. В связи с этим требовался датчик, обладающий достаточно высоким для регистрации быстродействием. Также важным параметром, оказывающим влияние на выбор датчика, были габариты самого объекта – при проведении экспериментов используются мыши массой около 20 грамм. Малые габариты и необходимость высокоскоростной регистрации изменений накладывают существенные ограничения на использования тех или иных типов датчиков.

Неинвазивность метода важна для снижения стресса, испытываемого лабораторной мышью, так как в состоянии стресса ее частота дыхания непроизвольно увеличивается, что негативно влияет на достоверность полученных измерений.

На рисунке 1 представлена схема макета устройства, включающая его основные компоненты и связи между ними. Черными стрелками обозначены соединения компонентов через провода, белой – физическое воздействие объекта на датчик.

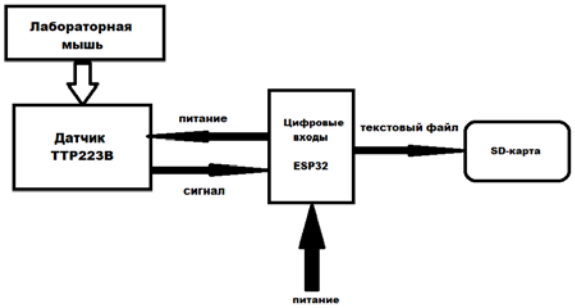

Рис. 1. Схема макета

A. *Емкостной сенсорный датчик TTP223B*

При разработке прототипа устройства для измерения частоты дыхания лабораторных животных было принято решение использовать в качестве чувствительного элемента ёмкостной сенсорный датчик TTP223B [5]. Этот модуль предназначен для обнаружения прикосновений и реагирует на изменение ёмкости встроенного конденсатора, вызванное приближением проводящего объекта — в данном случае грудной клетки или живота лабораторного животного. Емкость конденсатора описывается выражением

$$C = \frac{\varepsilon * \varepsilon_0 * S}{d},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, ε_0 – электрическая постоянная, S – площадь пластин, d – расстояние между пластинами.

Взаимодействие объекта с электрическим полем конденсатора представляет собой увеличение относительной диэлектрической проницаемости, и, следовательно, приводит к увеличению емкости, которое и регистрируется датчиком.

Датчик TTP223B был выбран среди аналогов на основе сравнения характеристик, представленных в табл. I.

ТАБЛИЦА I.

Параметр	TTP223B	TTP223 (красный)	AT42QT1010
Напряжение питания	2–5.5 В	2–5.5 В	1.8–5.5 В
Ток потребления	1.5–3 мкА	2–4 мкА	45 мкА
Время отклика	60 мс (активный)	80 мс	50 мс
Режимы работы	Триггер/Мгновенный	Мгновенный	Мгновенный
Работа через материал	До 6 мм (пластик, стекло)	До 4 мм	До 20 мм
Управления без МК	Да (через реле/светодиод)	Да	Нет (требует обвязки)

По сравнению с аналогами у датчика TTP223B есть ряд преимуществ, ключевыми из которых являются:

- Энергоэффективность – TTP223B обладает самым низким током в режиме ожидания (1,5 мкА);
- Простота интеграции – у датчика TTP223B всего три контакта (VCC, GND, SIG), он также совместим с 3.3 В и 5 В логикой.

Также важно отметить совместимость датчика – он работает с микроконтроллерами (Arduino, ESP32) через цифровые входы.

B. *Микроконтроллер ESP32*

Выбор микроконтроллера является ключевым решением при разработке устройства. Для реализации системы неинвазивного измерения частоты дыхания лабораторных животных был выбран микроконтроллер ESP32 [6]. ESP32 – семейство энергоэффективных микроконтроллеров с поддержкой Wi-Fi и Bluetooth, разработанных компанией Espressif Systems. Эти чипы широко применяются в IoT, промышленной автоматизации и умных устройствах благодаря низкой стоимости, высокой производительности и богатой периферии, что стало основной причиной для выбора. Выбор данного микроконтроллера был произведен на основе сравнения характеристик некоторых популярных решений, приведенных в табл. II.

ТАБЛИЦА II.

Характеристики	ESP32	STM32	Arduino Nano
Ядро	Xtensa LX6 (2 ядра)	ARM Cortex-M3	AVR
Разрядность	32 бита	32 бита	8 бит
Тактовая частота	до 240 МГц	72 МГц	16 МГц
ОЗУ	520 КБ	До 1 МБ	2 КБ
Постоянная память	до 16 МБ	2 МБ	32 КБ
Уровень сложности разработки	Средний	Высокий	Низкий
Поддержка беспроводных технологий	Wi-Fi + Bluetooth	Требует модулей	Нет

Таким образом, ключевыми преимуществами микроконтроллера ESP32 для решения поставленной задачи являются:

- Интегрированные беспроводные технологии (встроенные Wi-Fi и Bluetooth модули сокращают стоимость и сложность разработки IoT-устройств);
- Гибкость программирования (совместимость с Arduino IDE).

Для реализации устройства был выбран модуль ESP32-WROOM-32.

C. *Использование технологий 3D-печати*

В наше время технологии 3D-печати стали неотъемлемым инструментом в разработки устройств. Они позволяют в кратчайшие сроки перейти от простого создания наглядных моделей к производству функциональных прототипов, оснастки и даже серийных деталей сложнейшей геометрии. Разнообразие технологий и материалов позволяет подобрать оптимальное решение для каждой задачи на пути от концепции до готового продукта, ускоряя инновации и снижая барьеры для создания новых устройств.

При разработке устройства для неинвазивного измерения частоты дыхания лабораторных животных возникла необходимость создания дополнительных элементов конструкции, не относящихся к электрическим компонентам, а именно – проектирования и производства специализированных опор для поддержки фиксатора лабораторного животного и подложки для подведения к нему сенсорного датчика.

В связи с этим с помощью программного обеспечения КОМПАС-3D были созданы 3D-модели необходимых компонентов, которые были перенесены на оборудование для печати. Материалом для печатных компонентов послужил угленаполненный PLA – пластик с добавлением измельченных в пыль углеродных волокон, переплавленный, тщательно перемешанный и вытянутый в нити для печати. Угленаполненный PLA обладает рядом полезных при моделировании свойств:

- высокая прочность и жесткость (благодаря углеродным волокнам);
- легкость и устойчивость к истиранию;
- термостойкость и стабильность размеров;
- отсутствие усадки после охлаждения (обеспечивает точность и чёткость будущих моделей).

Созданные 3D-модели печатных компонентов представлены на рис. 2 и 3.

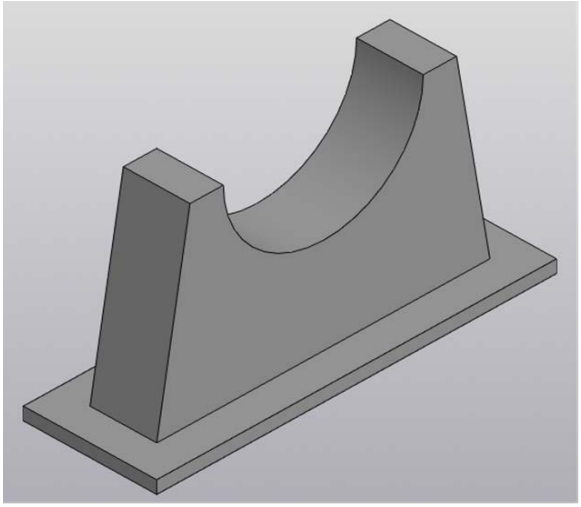

Рис. 2. 3D-модель опоры

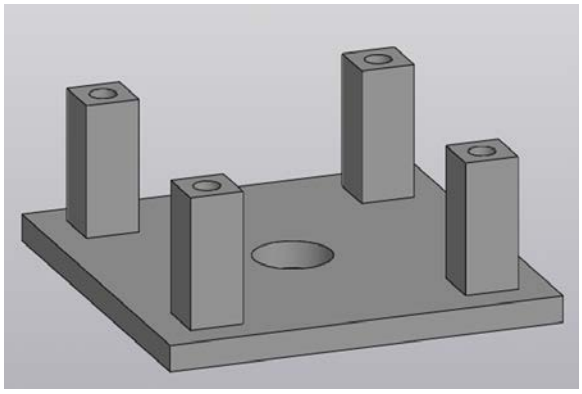

Рис. 3. 3D-модель подложки

Прототип устройства состоит из следующих основных элементов:

- фиксатор (рестрейнер) – прозрачный пластиковый контейнер-колба, в котором размещается лабораторное животное. Он ограничивает подвижность, позволяя сохранить физиологическую активность и снизить уровень шума в измерениях. В конструкции предусмотрены отверстия для вентиляции, обеспечивающие свободный доступ воздуха, а также открытая зона для подведения чувствительного датчика, с которым животное контактирует грудной клеткой или животом во время дыхания;
- емкостной сенсорный датчик TTP223B – регистрирует прикосновения животного. Каждый контакт соответствует одному дыхательному движению;
- микроконтроллер ESP32 – управляет процессом измерения: принимает сигналы от датчика, определяет точное время каждого касания и записывает метки времени на внешнюю карту памяти;
- модуль SD-карты – подключен к ESP32 через SPI-интерфейс и служит для хранения собранных данных в виде текстового файла со списком временных меток.

III. Описание проведение эксперимента

В процессе разработки была составлена методика проведения измерения частоты дыхания лабораторного животного с применением разработанного прототипа устройства. Ход эксперимента включает в себя следующие шаги:

- Лабораторное животное (мышь) помещается в рестрейнер – важно дать животному немного времени, так перемещение из привычной среды и помещение в ограниченное пространство вызывает стресс и негативно отражается на точности проводимых измерений;
- Рейстрейнер устанавливается на подставки;
- Измерительное устройство устанавливается под специально отведенной для контакта областью;
- Производится измерение – при каждом дыхательном движении тело животного касается чувствительной поверхности сенсорного датчика; датчик фиксирует касание и передаёт сигнал на микроконтроллер;
- Микроконтроллер ESP32 записывает текущую временную метку на SD-карту в виде текстового файла;
- После завершения эксперимента файл с метками экспортируется и анализируется с помощью программного обеспечения.

Алгоритм измерений представлен на рис. 4.

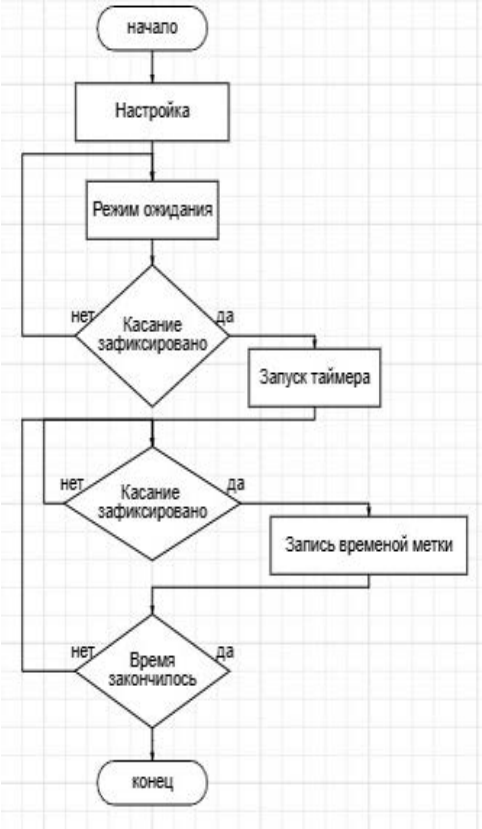

Рис. 4. Алгоритм измерений

Обработка данных осуществляется с помощью оконного приложения – создаваемый этим приложением Excel-файл содержит временные метки, отображающие дыхательные движения лабораторного животного, полученные в результате проведения тестирования устройства. Результаты представлены на рис. 5 и 6.

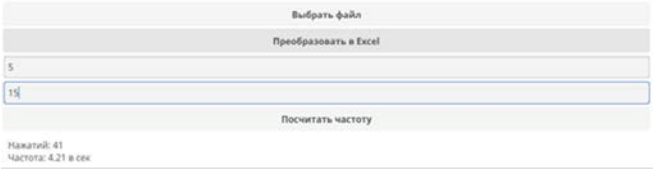

Рис. 5. Обработка данных оконным приложением

	A	B	C	D	E
1	№	Метка времени	Время измерения, в секундах	Статистика	
2	0	0	300	Всего нажатий	1200
3	1	0,31		Минимальный интервал (сек)	0,18
4	2	0,58		Максимальный интервал (сек)	0,32
5	3	0,89		Средний интервал между нажатиями (сек)	0,25
6	4	1,1			
7	5	1,29			
8	6	1,52			
9	7	1,78			
10	8	2,07			

Рис. 6. Excel-файл, содержащий результаты измерений

IV. Заключение

Данная разработка позволит стандартизировать методы проведения измерения частоты дыхания лабораторных животных, а также провести интеграцию новых технологий в процесс, что открывает возможности для последующего расширения функционала подобных устройств в сфере медицинской техники и адаптации привычных алгоритмов проводимых исследований к современным реалиям.

В качестве направления дальнейшей модификации прототипа можно выделить использование встроенных модулей для передачи собранных данных и создание подвижных опор для регулировки конфигурации установки.

Список литературы

[1] Гаранин А.А., Шипунов И.Д., Рубаненко А.О., Санникова Н.О. Бесконтактные методы измерения частоты дыхания: Обзор // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2023. №5. С. 64-72.

[2] Макарова М.Н., Шубин Д.В., Макаров В.Г. Частота дыхательных движений в доклинических исследованиях. Лабораторные животные для научных исследований. 2019; 3. С. 03-03.

[3] Стенина М.А., Кривов Л.И., Спиридонов И.Н., Таранов А.А. Дистанционное измерение частоты дыхания лабораторных мышей при исследованиях mdx-модели прогрессирующей мышечной дистрофии Дюшенна // Медицинская Техника. 2015. №2. С. 12-16.

[4] Кривченко И. Современные интегральные микросхемы для построения емкостных сенсоров // Компоненты и Технологии. Электронное издание. 2006. №62. С. 38-42.

[5] Datasheet TTP223 [Электронный ресурс]. - URL: https://vakits.com/sites/default/files/TTP223B%20Touch%20Switch.pdf / (дата обращения: 07.04.2025).

[6] Datasheet ESP32-WROOM-32D & ESP32-WROOM-32U [Электронный ресурс]. - URL: https://static.chipdip.ru/lib/652/DOC040652164.pdf/ (дата обращения: 09.04.2025).