

### СЕКЦИЯ 3. ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.62

#### Н. Ю. БАЛИНСКИЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ МАШИНЫ ОБЕРБЕКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТРЕНИЯ ГИБКИХ ЛЕНТ О ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Статья посвящена рассмотрению вопроса о возможности модернизации машины Обербека для изучения трения гибкой лентой о цилиндрическую вращающуюся поверхность, а также для косвенного измерения коэффициента трения при таком взаимодействии. Показано, что машина Обербека по своей конструкции подходит для создания лабораторной установки по изучению трения скольжения.

Гибкие ленты, ремни и другие подобные материалы, которые оказывают малое сопротивление при изгибе, получили широчайшее применение в механизмах в виде ременных приводов или ленточных тормозов. Изучение трения в машиностроении играет ключевую роль в оптимизации и совершенствовании различных технических устройств. Среди многих направлений в этой области стоит отметить анализ трения гибкой лентой об цилиндрическую поверхность. Машина Обербека может представлять собой полезное устройство для изучения трения гибкой лентой о цилиндрическую поверхность.

В данной статье рассматривается возможный вариант модификации машины Обербека, благодаря которому можно экспериментально изучать явление трения гибкой лентой о поверхность (рисунок 1).

Вся динамика взаимодействия гибкой лентой с цилиндрической поверхностью может быть описана формулой Эйлера:

$$T_2 = T_1 e^{\mu \Delta \alpha},$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – силы натяжения гибкой лентой со стороны ее свободного и закрепленного конца, соответственно;  $\mu$  – коэффициент трения лентой о поверхность;  $\Delta \alpha$  – угол между точками отрыва лентой от поверхности с вершиной в точке вращения.

Момент силы трения между лентой и поверхностью цилиндра будет равен

$$M_{\text{тр}} = T_2 R - T_1 R = T_1 R \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right),$$

где  $T_1 = m_0 g$ . Из формулы Эйлера получим  $T_2 / T_1 = e^{\mu \Delta \alpha}$ . Тогда

$$M_{\text{тр}} = m_0 g R (e^{\mu \Delta \alpha} - 1),$$

откуда можно найти коэффициент трения:

$$\mu = \frac{1}{\Delta \alpha} \ln \left( 1 + \frac{M_{\text{тр}}}{m_0 g R} \right).$$

Следует учесть, что момент силы трения  $M_{\text{тр}}$  представляет собой лишь часть общего момента диссипативных сил, второй частью которого является момент силы трения в оси вращающегося цилиндра и сила сопротивления воздуха, возникающая при движении грузов:

$$M_{\text{дисс}} = M_0 + M_{\text{тр}}.$$

Если груз с массой  $m$  поднять на высоту  $h_1$  и отпустить, то в начальный момент времени потенциальная энергия будет равна  $mgh_1$ , а кинетическая энергия будет иметь нулевое значение. Груз опустится на минимальную высоту и приобретет максимальную кинетическую энергию. Однако крест Обербека по инерции продолжит вращаться и поэтому груз с массой  $m$  начнет дальше подниматься до некоторой высоты  $h_2$  и в итоге остановится, приобретя при этом потенциальную энергию, равную  $mgh_2$ . По закону сохранения энергии изменение полной механической энергии равно работе всех диссипативных сил, действующих на механическую систему:

$$E_{\text{дисс}} - E_1 = A_{\text{дисс}} = -M \cdot \varphi,$$

где  $\varphi = (h_1 + h_2) / r$  – полный угол, на который повернется цилиндрический вал креста Обербека за время движения груза  $m$ .

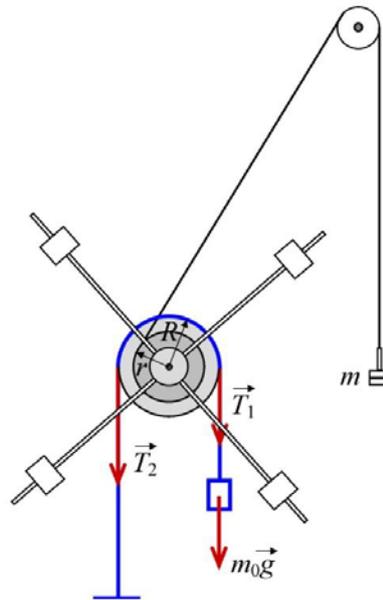


Рисунок 1 – Схематическое изображение основных узлов модифицированной машины Обербека, позволяющей изучать трение гибкой ленты с цилиндрическим вращающимся валом

Тогда получим:

$$mgh_{\text{дисс}} - mgh_1 = -M \frac{h_1 + h_2}{r},$$

откуда найдем

$$M_{\text{дисс}} = mgr \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} = M_0 + M_{\text{тр}},$$

причем  $h_1 > h_2$ .

В итоге, коэффициент трения можно определить по формуле

$$\mu = \frac{1}{\Delta\alpha} \ln \left( 1 + \frac{mgr}{m_0 g R} \left( \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \right) - \frac{M_0}{m_0 g R} \right).$$

В случае, когда  $M_{тр} \ll M$ , получим выражение

$$\mu \approx \frac{1}{\Delta\alpha} \ln \left( 1 + \frac{mgr}{m_0 gR} \left( \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \right) \right).$$

Таким образом, коэффициент трения между гибкой лентой и вращающимся цилиндрическим валом может быть измерен косвенным способом, если модернизировать машину Обербека и использовать ее вращающийся цилиндрический вал в контакте с закрепленной с одного конца гибкой лентой. Следовательно, модернизированную таким образом машину Обербека можно использовать в качестве учебной лабораторной установки в лабораторной физическом практикуме.

#### Список литературы

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – М. : Физматлит, 2006.
2. Яблонский, А. А. Курс теоретической механики / А. А. Яблонский, В. М. Никифорова. – М. : Высшая школа, 1966.

The article is devoted to considering the possibility of upgrading the Oberbeck machine to study the friction of a flexible tape on a cylindrical rotating surface, as well as to indirectly measure the friction coefficient during such interaction. It is shown that the design of Oberbeck's machine is suitable for creating a laboratory setup for studying sliding friction.

*Балинский Никита Юрьевич*, студент 4-го курса физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Balinskij.NJ@gmail.com.

Научный руководитель – *Лавыш Андрей Валентинович*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, Lavysh\_AV@grsu.by.

УДК 621.396.062

А. А. БОЙКО, О. А. ГРИМУТО

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАКЕТОМ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ ДВУХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА И УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА РАССТОЯНИЯ

Описывается разработанный авторами макет роботизированной транспортной платформы на основе двух двигателей постоянного тока и ультразвукового датчика расстояния до препятствия и системы управления на основе контроллера Arduino Mega 2560-. Интерфейс пользователя реализован на основе модуля матричного LCD-индикатора с кнопками управления. Также разработано программное обеспечение на языке программирования ArduinoC++, реализующее автоматический режим работы макета и контрольное меню, позволяющее настроить параметры макета: чувствительность ультразвукового датчика, скорость платформы и направление её движения, экстренное включение и выключение двигателей, определение и вывод на дисплей среднего расстояния до препятствия. В автоматическом режиме работы платформа самостоятельно корректирует свое движение в зависимости от расстояния до препятствия.

В настоящее время продолжают создаваться и использоваться новые робототехнические комплексы, которые требуют наличия обученного, высококвалифицированного персонала. В целях обучения начинающих специалистов в учреждениях образования создаются уменьшенные копии – макеты данных комплексов.

В данной работе описывается создание одного из таких макетов – уменьшенной копии роботизированной транспортной платформы, который состоит из 2-х двигателей постоянного тока (далее – ДПТ), ультразвукового датчика (далее – УЗ-датчик), драйвера для двигателей, дисплея, двух валов и резиновой ленты. Работает данная платформа следующим образом:

1. На ленту ставится объект.

2. Ультразвуковой датчик считывает расстояние до объекта.

3. Происходит запуск двигателей, пока расстояние не становится меньше заданного, лента транспортирует объект влево, после чего движение останавливается. Это базовый алгоритм работы макета, и он может быть легко изменен.

Управление платформой также возможно в ручном режиме. Для этого необходимо открыть меню, зайти в раздел «Отладка» («Debug»), при этом отключается автоматический режим работы. Данный режим позволяет пользователю запускать двигатель в двух направлениях и останавливать его вручную; при выходе из данного раздела пользователь возвращается в автоматический режим.

В актуальных на январь – февраль 2024 года статьях по смежной теме описывается реализация колёсного робота [1–3], а не роботизированной транспортировочной ленты. Рассмотрим подробнее применённые в данном проекте компоненты и устройства:

Для нашего макета мы сконструировали деревянное шасси, которое послужило его основой. Это был оптимальный выбор с точки зрения затрат, поскольку металлическая конструкция стоила бы в четыре раза дороже. В связи с отсутствием в продаже подходящих материалов для валовмы адаптировали небольшие пластиковые контейнеры и крышки с необходимым креплением. На эти валы мы установили и закрепили резиновую ленту. Реализованная конструкция проста, надежна, и позволяет быстро заменить вышедшие из строя компоненты и исправить работу макета в случае необходимости.

Для подключения большинства модулей нами использовалась безопасная макетная плата на 170 точек – это универсальная печатная плата для сборки и моделирования прототипов электронных устройств без пайки. Основой проекта является микроконтроллерная плата разработки Arduino Mega 2560 на основе ATmega2560. Она имеет 54 цифровых входа/выхода (15 ШИМ-выходов), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта, кварцевый генератор, USB-разъем, разъем питания [4]. Эта плата предназначена для проектов, которые требуют большого количества линий ввода/вывода, большого объема памяти для скетчей и большого объема оперативной памяти. Arduino Mega 2560 совместима с большинством модулей, разработанных для ArduinoUno, и может быть запрограммирована с помощью Arduino IDE. По мнению сторонних разработчиков, именно Arduino Mega 2560 как нельзя лучше подходит для создания робототехнических проектов и других устройств, взаимодействующих с окружающей средой. Принцип работы Arduino Mega 2560 заключается в том, что он выполняет скетч, загруженный на него через USB, и управляет подключенными к нему компонентами, такими как светодиоды, датчики, моторы и др.

Для реализации процесса управления ДПТ нами использовались управляющая плата (драйвер) L298N и два двигателя постоянного тока. Драйвер L298N [5; 6; 7] представляет собой модуль, основанный на популярной микросхеме L298N, которая содержит два H-моста для управления двумя двигателями постоянного тока. H-мост – это схема, позволяющая менять направление вращения двигателя путем смены полярности на его выводах. Драйвер L298N имеет входы для подключения питания двигателей (до 35 В) и питания логики (5 В), а также выходы для подключения 2 двигателей постоянного тока (OUT1/2 и OUT3/4). Управление драйвером осуществляется с помощью сигналов на командных входах (IN1, IN2, IN3, IN4), которые можно подключать к цифровым выводам любого контроллера, в нашем случае это Arduino Mega 2560. Драйвер L298N подходит для управления различными типами двигателей постоянного тока, от слабых до мощных, а также биполярными шаговыми двигателями.

Мы использовали ДПТ неизвестного производителя, с напряжением питания 12 В и ориентировочной мощностью около 10 Вт. Как и авторы [1–3], для получения данных о расстоянии до объекта мы используем УЗ-датчик HC-SR04. Это ультразвуковой дальномер, который работает по принципу эхолокации [8–10]. Он посылает ультразвуковой сигнал и принимает его отражение от объекта, измеряя время между отправкой и получением импульса. Из этого времени можно вычислить расстояние до объекта, учитывая известную скорость звука в воздухе. HC-SR04 имеет четыре контакта: VCC и GND для подключения питания 5 В, и Trig и Echo для управления сигналами. УЗ-датчик HC-SR04 может измерять расстояние в диапазоне от 2 до 450 см с точностью до 3 мм и углом обзора до 15 градусов. Ультразвуковой датчик HC-SR04 – это лучшее решение по соотношению цена:качество, именно поэтому мы использовали его в данном проекте.

Блок питания, используемый для макета – лабораторный, регулируемый, с выходным напряжением до 15В и током нагрузки до 3А. Для реализации системы управления нами использовался модуль LCD-дисплея 1602 с интегрированной панелью клавиш (LCD KeypadShield) [11]. Данное решение оказалось наиболее практичным, поскольку не требует большого числа подключений для каждой из кнопок управления.

Таким образом, устройства и компоненты (рис. 1), применённые в данном проекте, являются вполне подходящими для его реализации.

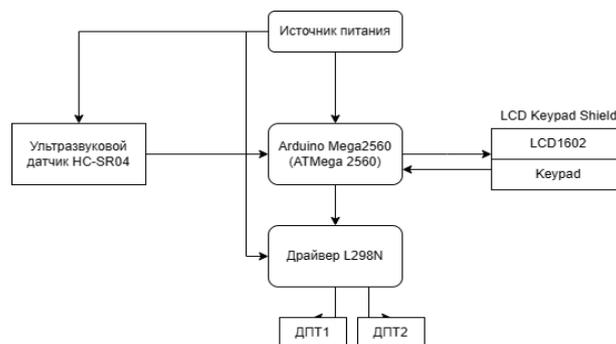


Рисунок 1 – Схема взаимодействия компонентов макета

Рассмотрим программное обеспечение, предназначенное для управления макетом роботизированной транспортной платформы. Программное обеспечение представляет собой исполняемый код на языке программирования C++ для платформы Arduino.

В основе работы программы лежит управление двигателями и обработка данных от ультразвукового датчика.

Двигатели управляются при помощи драйвера L298N, который позволяет изменять направление и скорость вращения двигателей. Для установки направления движения «влево» на контактах драйвера IN1, IN3 необходимо установить значение LOW, на IN2, IN4 – HIGH. Для установки движения «вправо» наоборот: IN2, IN4 – LOW, IN1, IN3 – HIGH. Скорость вращения двигателей возможно установить, послав на обмотки ENA и ENB драйвера ШИМ-сигнал – значение от 0 до 255 (коэффициент заполнения 0–100 %).

Ультразвуковой датчик HC-SR04 используется для определения расстояния до препятствия (в данном случае, объекта). Данные с датчика обрабатываются и используются для корректировки движения платформы. В процедуре обработки данных, полученных с ультразвукового датчика, мы считываем по 50 значений расстояния, затем производим расчет усечённого среднего его значения, так как это позволяет добиться более высокой точности измерений, что очень важно для данной установки.

Программа также включает в себя систему меню, отображаемую на дисплее модуля LCD KeypadShield. Меню позволяет пользователю настраивать параметры работы платформы, такие как скорость, переходить в режим отладки для исправления работы платформы, и просматривать информацию о комплектующих макета и его разработчиках.

В программе реализованы следующие функции:

- Включение и выключение двигателей.
- Изменение направления движения двигателей.
- Определение и вывод на дисплей среднего расстояния до препятствия.
- Настройка скорости двигателей через меню.
- Автоматический режим работы, в котором платформа самостоятельно корректирует свое движение в зависимости от расстояния до препятствия.

Таким образом, созданный программно-аппаратный комплекс является хорошим, наглядным примером функционирования транспортной платформы. Созданное нами устройство можно использовать также и для демонстрации автоматической транспортировки различных грузов в учебном процессе.

#### *Список литературы*

1. Боряк, С. В. Система управления перемещением мобильного робота в закрытых помещениях на основе данных ультразвуковой системы [Электронный ресурс] / С. В. Боряк // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 4 (52). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-upravleniya-peremescheniem-mobilnogo-robota-v-zakrytyh-pomescheniyah-na-osnove-dannyh-ultrazvukovoy-sistemy>.
2. Azeta, Joseph. Обнаружение препятствий с помощью ультразвукового датчика для мобильного робота / Joseph Azeta, Christian Bolu, Daniel Hinvand, Abiodun A. Abioye // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Т. 707.
3. Bala Krishna K., Rachananjali K., CH. .N. Narasimha Rao – Obstacle avoiding robotic vehicle with arduino and ultrasonic sensor [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sciencescholar.us/journal/index.php/ijhs/article/view/6463>.
4. Mega 2560 Rev3 | Arduino Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>.
5. L298N Datasheet(PDF) – STMicroelectronics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/22440/STMICROELECTRONICS/L298N.html>
6. Драйверы двигателя L298N, L293D и Arduino Motor Shield [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/drajver-dvigatelya-i-motor-shield-arduino>.
7. Control DC and Stepper Motors With L298N Dual Motor Controller Modules and Arduino : 3 Steps – Instructables [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.instructables.com/Control-DC-and-stepper-motors-with-L298N-Dual-Moto>.
8. HC-SR04 Datasheet(PDF) – List of Unclassified Manufacturers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132203/ETC2/HC-SR04.html>.
9. Датчик расстояния HC-SR04 – ультразвуковой модуль Ардуино [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/ultrazvukovoj-dalnomer-hc-sr04/>
10. How HC-SR04 Ultrasonic Sensor Works & How to Interface It With Arduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lastminuteengineers.com/arduino-sr04-ultrasonic-sensor-tutorial/>
11. LCD Keypad Shield For Arduino SKU DFR0009-DFRobot Info & Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://wiki.dfrobot.com/LCD\\_KeyPad\\_Shield\\_For\\_Arduino\\_SKU\\_DFR0009](https://wiki.dfrobot.com/LCD_KeyPad_Shield_For_Arduino_SKU_DFR0009).

The paper describes a model of a robotic transport platform based on two DC motors and an ultrasonic obstacle distance sensor and a control system based on an Arduino Mega 2560 controller developed by the authors. The user interface is realised based on a matrix LCD-indicator module with control buttons. Also, the software on programming language Arduino C++, realising automatic mode of work of the layout and the control menu, allowing to adjust parameters of the layout: sensitivity of an ultrasonic sensor, speed of a platform and a direction of its movement, emergency switching on and switching off of motors, definition and display of

average distance to an obstacle is developed. In automatic mode the platform independently corrects its movement depending on the distance to the obstacle.

*Бойко Александр Андреевич*, студент 4-го курса физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, alexanderboyko02@outlook.com.

*Гримута Олег Андреевич*, студент 4-го курса физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, o.grimuta+fks@gmail.com.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

УДК 004.932

М. А. БОЧКО

## **СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛИПУЧЕК ПОДГУЗНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ**

Описана созданная автором система на основе подходов машинного зрения для контроля качества липучек, выпускаемых на производственной линии, для подгузников различных размеров.

Целью настоящей работы является разработка системы, способной контролировать качество выпускаемой продукции в реальном времени с использованием подходов машинного зрения.

Контроль качества является важной составляющей производства продукции, поскольку качество производимых изделий прямо влияет на безопасность и комфорт потребителей, а также на репутацию производителя. Традиционные методы контроля качества требуют значительных ресурсов и времени, поэтому внедрение системы контроля качества с использованием технологий машинного зрения может быть эффективным решением. В этом докладе будет рассмотрена система контроля качества липучек подгузника с использованием технологий машинного зрения и ее преимущества.

### ***Принцип работы системы контроля качества:***

Система контроля качества липучек основана на анализе изображений и детекции дефектов. Участок, анализируемый камерами, подсвечивается контрольным светом, что необходимо для подчёркивания контура липучки, поскольку её цвет очень схож с цветом основного материала, на котором она закреплена, что в обычных условиях значительно затрудняет идентификацию контура липучки. Две камеры машинного зрения, получают изображение левого и правого участков материала соответственно. Компьютер, к которому подключены камеры, получает и анализирует изображения, позволяет оператору настраивать систему.

### ***Система по контролю качества состоит из следующих компонентов:***

Камеры: используются скоростные камеры с максимально допустимой частотой кадров 120 fps при разрешении 640×480 пикселей для захвата изображений липучек подгузника.

Компьютер планшетного типа. Необходим для настройки оператором системы машинного зрения и визуализации работы системы.

Интеллектуальное программное обеспечение: специальные алгоритмы машинного зрения обрабатывают полученные изображения и анализируют их на наличие дефектов.

Система управления: сигнал на отбраковку передаются в промышленный логический контроллер, управляющий пневматической системой отбраковки.

### ***Задачи, поставленные перед системой:***

- Определение длины липучки и отбраковка при обнаружении липучки с длиной, меньше заданной.
- Определение угла поворота приклеенной липучки и отбраковка при обнаружении липучки повернутой на угол больший, чем заданный
- Определение отсутствия липучки.

### ***В ходе разработки системы для контроля качества были решены следующие проблемы:***

1. Выбор подходящей камеры. Для данной задачи использовалась USB камера 2 МП с максимальной частотой кадров 120 fps при разрешении 640×480 и использовании кодека MJPEG, изображённая на рисунке 1.

2. Выделение контура липучки для более точного распознавания. Достигается путём использования контрольного света с возможностью регулировки яркости, что необходимо при использовании основного материала разной плотности, для предотвращения засветки камеры.

3. Подбор подходящих алгоритмов обнаружения и методов фильтрации для повышения точности определения липучки.



Рисунок 1 – Камера машинного зрения

4. Расчёт геометрических параметров липучки посредством привязки к эталонному значению, в качестве которого является ширина липучки.

5. Использование потокового режима работы. Поскольку при чтении кадров с камеры выполняются операции кодирования-декодирования, занимающие достаточно продолжительное время и тормозящие все остальные вычисления, при использовании нескольких камер в проекте следует использовать многопоточный режим, позволяющий не ждать завершения чтения кадра с одной камеры, а сразу ждать данные с двух камер. Однако это не является абсолютно одновременным процессом, поскольку в языке Python, используемом в данном проекте, есть некоторые ограничения, а именно Gil (Global Interpreter Lock) – это механизм, используемый в некоторых реализациях Python, чтобы обеспечить потокобезопасность в контексте многопоточных приложений. Главная цель GIL состоит в том, чтобы предотвратить несогласованность данных и гонки за ресурсами, которые могут возникнуть, когда несколько потоков одновременно обращаются к общим объектам в памяти. GIL работает, ограничивая доступ к интерпретатору Python только одному потоку на время выполнения. Это означает, что даже если есть множество потоков, которые должны выполняться параллельно, на самом деле только один поток может исполняться в любой конкретный момент времени. Остальные потоки ожидают, пока не будет освобожден GIL.

6. Создание удобного интерфейса, изображённого на рисунке 2, для настройки и отображения происходящих в системе процессов.

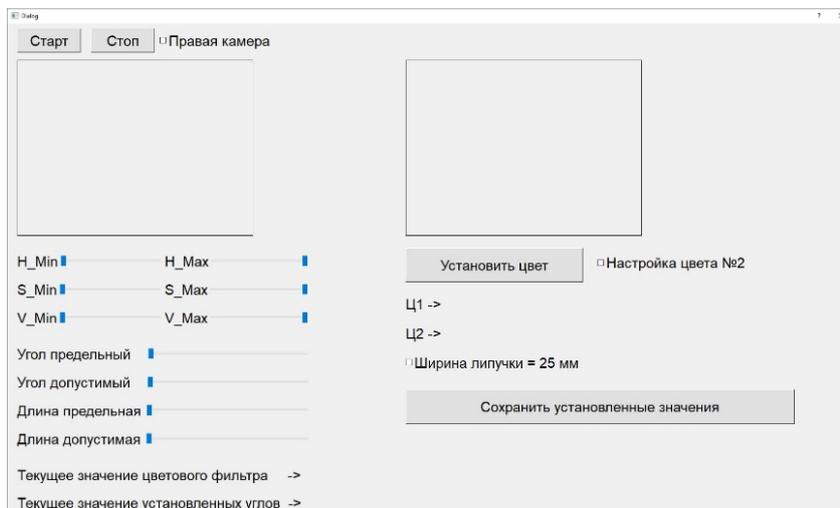


Рисунок 2 – Интерфейс оператора

#### *Преимущества системы контроля качества:*

- Повышение уровня автоматизации. Система контроля качества на основе машинного зрения позволяет автоматизировать процесс контроля, что значительно снижает время и затраты, связанные с ручным контролем.
- Повышение точности. Технологии машинного зрения обеспечивают высокую точность и надежность в определении дефектов, что позволяет исключить субъективный фактор человеческого вмешательства.
- Увеличение производительности. Система контроля качества может обрабатывать большое количество подгузников за короткий промежуток времени, увеличивая общую производительность производства.
- Улучшение качества продукции. Раннее обнаружение и исправление дефектов приводит к повышению качества продукции и снижению количества брака.

Таким образом, внедрение системы контроля качества липучек подгузника с использованием технологий машинного зрения является важным шагом в современном производстве. Эта система позволяет автоматизировать процесс контроля, обеспечивает высокую точность и улучшает качество продукции. Она способствует увеличению производительности и снижению расходов, а также повышает безопасность и

комфорт малышей. Системы контроля качества на основе машинного зрения становятся все более популярными в различных отраслях, и их применение в производстве подгузников является важным шагом в направлении повышения качества и эффективности производства.

The paper describes a system created by the author based on machine vision approaches for monitoring the quality of Velcro for diapers of various sizes produced on a production line.

*Бочко Матвей Андреевич*, студент 4-го курса физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, matvey.bochko.2003@mail.ru.

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, german@grsu.by.

УДК 621.785.53

## Л. С. ВЕРТИНСКИЙ

### ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ АЗОТИРОВАНИЕ СТАЛЕЙ В ПРОМЫШЛЕННОЙ УСТАНОВКЕ

Рассмотрены технологические параметры ионно-плазменного упрочнения изделий из конструкционной и коррозионностойкой стали 40X, 38X2МЮА, 30X13. Изучены свойства упрочненных слоев.

Ионно-плазменное азотирование (ИПА) обеспечивает получение диффузионных слоёв равномерных по профилю детали с плавно понижающейся твёрдостью по глубине слоя и существенное повышение стабильности результатов упрочнения. От характеристик получаемых слоев зависит долговечность и качество изделий. Азотируемые изделия используются в различных деталях машин и агрегатов, испытывающих абразивный износ или износ трением. В зависимости от условий ионного азотирования может быть сформирован упрочненный слой, который будет иметь повышенную коррозионную стойкость или более высокую стойкость к износу.

Проводится большое количество исследований по влиянию ИПА на свойства сталей и чугунов. Подавляющее их число выполнено с использованием оборудования лабораторного типа с объемом рабочего пространства порядка 0,01–0,10 м<sup>3</sup> и, как правило, при обработке одного или небольшого количества образцов. Между тем характер протекания процессов ИПА в такого рода экспериментальных установках и соответственно достигаемые результаты обработки могут существенно отличаться от условий протекания процесса в оборудовании промышленного типа с объемом рабочего пространства порядка 1–10 м<sup>3</sup> и полученных свойств реальных полномасштабных изделий (либо садок деталей) массой до 1–3 т и более.

Конструкция оборудования ИПА является одним из ключевых моментов, влияющих на качество упрочняемых слоев. Так как в печи атмосфера разряжена (давление обработки 80–200 Па), распространение тепла в рабочей камере практически не может происходить за счет конвекционного потока газа, как при газовой ХТО. При термообработке в вакууме при давлении 100 Па или ниже вкладом естественной конвекции можно пренебречь [1], к тому же разряд при ИПА нагревает заготовку, передавая мощность ионной бомбардировкой, а не путем теплопередачи и принудительной конвекции. Место напуска газа и место его откачки могут создать градиент давления с возможностью локальных флуктуаций потока газа и вариаций парциального давления легирующего газа. Оценка теплового баланса печи и распределения температурного поля имеет важное значение для достижения стабильной структуры и глубины слоя по садке. Расположение в рабочей зоне влияет на локальные неоднородности температуры, что может приводить к дефектам азотируемого слоя или его несоответствию конструкторской документации.

#### **Материалы и оборудование.**

Ионно-плазменную обработку экспериментальных образцов проводили на промышленном оборудовании секционного типа, разработанном в ФТИ НАН Беларуси (рисунок 1). Исследовано влияние ионного азотирования на свойства широко применяемых сталей 40X, 38X2МЮА, 30X13 (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав исследуемых марок сталей (Fe – основа)

Сталь	Химический состав, мас. %						
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
40X	0,36–0,44	0,17–0,37	0,5–0,8	до 0,3	до 0,035	до 0,035	0,8–1,1
30X13	0,26–0,35	до 0,8	до 0,6	до 0,025	до 0,03	до 0,2	до 14
38X2МЮА	0,35–0,42	0,2–0,45	0,3–0,6	до 0,3	до 0,025	до 0,025	1,35–1,65

Конструкционная сталь 40X применяется для изготовления деталей машин, работающих в условиях высоких нагрузок. Структура феррито-перлитная, после улучшения троосто-сорбитная с малой долей остаточного аустенита. Сталь 38X2МЮА принадлежит к классу нитралоев, разработанных для изготовления упрочняемых азотированием изделий и содержит элементы, повышающие растворимость азота в феррите. Особо высокую твердость (до HV 1100-1200) имеют нитриды хрома, молибдена и алюминия. Сталь 30X13 – коррозионно-стойкая ферритно-мартенситного класса. Применяется после закалки и низкого отпуска, обладает повышенной твердостью. Структура после отпуска феррито-карбидная, мартенсит отпуска.

#### Выбор технологических параметров.

Важными параметрами, характеризующими интенсивность процесса ионного азотирования, являются плотность потока диффундирующего в сталь азота, функции параметров разряда (плотности тока и напряжения) и заданного расхода газа. Выполнен расчёт потока азота для исследованных сталей с использованием экспериментальных данных по глубине азотированного слоя при различных температурах и разном времени азотирования [2]. Плотность потока азота  $\Pi_{N_2}$ , л/(ч·м<sup>2</sup>) должна выбираться в зависимости от величины растворимости азота и коэффициента диффузии в  $\alpha$ -твердом растворе для конкретной марки стали [3]:

$$\Pi_{N_2} \left( \frac{\text{л}}{\text{ч}\cdot\text{м}^2} \right) = 0,89 C_{\alpha\text{-Fe}}^{\text{лег}} \sqrt{D_{\alpha\text{-Fe}}^{\text{лег}}} / \sqrt{\tau} \quad (1)$$

где 0,89 – коэффициент пропорциональности,  $D_{\alpha\text{-Fe}}^{\text{лег}}$  – коэффициент диффузии азота в  $\alpha$ -твердом растворе легированной стали;  $\tau$  – время, в течение которого при потоке азота  $\Pi_{N_2}$  концентрация его в поверхностном слое достигает значения, равного величине растворимости в  $\alpha$ -Fe, при дальнейшем увеличении концентрации может начаться образование белого слоя ( $\gamma' + \epsilon$ ), существенно замедляющего диффузию азота в металл.

Предельная концентрация газа для заданной растворимости в стали [3]:

$$C_{\alpha\text{-Fe}}^{\text{лег}} = 9,47 \cdot 10^7 \cdot \%N / (14 + 41,85 \cdot \%N) \quad (2)$$

где % N – растворимость азота (в массовых процентах) в  $\alpha$ -твердом растворе стали [4].

При азотировании материалов в качестве газовой среды используют смесь азота с различными газами (аргон, гелий, неон, водород). Инертные газы позволяют значительно повысить интенсивность ионизационных процессов в плазме, а водород необходим для связывания остаточного кислорода, парциального давления которого при повышенных рабочих давлениях газа (до 500 Па) достаточно для формирования оксидных пленок, блокирующих поступление активного азота к поверхности детали. Согласно [3], доля азота в составе газовой смеси определяется как  $\Pi_{N_2} / \sqrt{\tau}$ . Исходя из выражений (1,2), рассчитан поток смеси газов ( $N_2$ ,  $H_2$ , Ar) для сталей 38X2МЮА, 40X, 30X13. С учетом ранее накопленного экспериментального опыта выбраны режимы ИПА сталей:

- 30X13 – температура 540 °С, время 18 ч, давление 140 Па, расход смеси газов 26 л/ч;
- 40X – температура 520 °С, время 18 ч, давление 160 Па расход смеси газов 28,6 л/ч;
- 38X2МЮА – температура 520 °С, время 22 ч, 140 Па расход смеси газов 43 л/ч.

В соответствии с разработанным в ФТИ НАН Беларуси подходом, процесс ИПА разбивается на заданное число шагов, состав смеси газов в которых отличается. Количество шагов и их длительность задаются, исходя из необходимости сформировать азотированный слой требуемой глубины на конкретных марке стали и детали с учетом её габаритов.

**Результаты.** Металлографический метод не всегда позволяет точно определить границу азотированного слоя, наиболее надежным способом является замер микротвердости. Глубину азотированного слоя, согласно СТБ 2307-2013 «Поверхностно-упрочненные слои металлических изделий. Методы измерения толщины», определяют из распределения микротвердости по глубине на поперечном шлифе от поверхности к центру (рисунок 2) с использованием микротвердомера AFFRI-MVDM8. Эффективной глубиной слоя является расстояние от поверхности изделия до участка, твердость которого на 50 HV превышает твердость сердцевины.



Рисунок 1 – Вид установки ИПА с двухсекционной камерой

Для 30X13 эффективная глубина азотированного слоя составила 0,2 мм, микротвёрдость у поверхности 1090 HV. Высокая твердость обусловлена образованием нитридов хрома. Сердцевина в нормализованном состоянии. Отсутствие плавного градиента падения твердости обусловлено низкой диффузионной подвижностью азота из-за высокого содержания хрома.

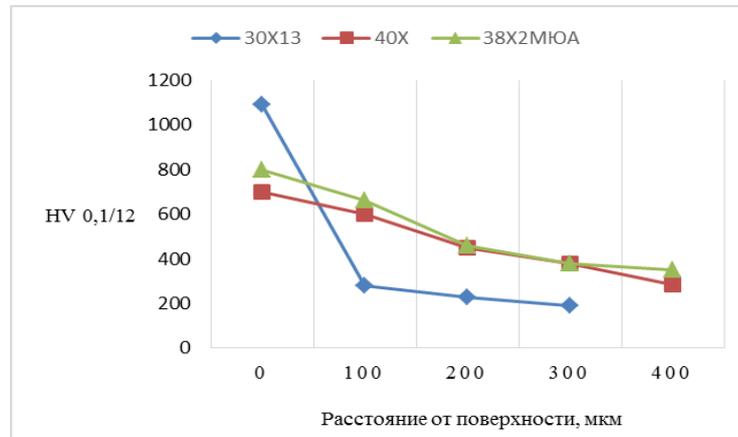


Рисунок 2 – Графики распределения микротвёрдости по глубине азотированных слоёв

Микротвердость стали 40X составила 700 HV у поверхности, глубина слоя 600 мкм. В этой стали хром имеет небольшую массовую долю и его влияние на твердость меньше, чем у стали 30X13. Вместе с тем твердость азотированной стали 40X достаточно высокая, так как помимо карбидов хрома в результате азотирования происходит дисперсионное упрочнение благодаря нитридам железа. Отсутствует нитридная зона (белый слой), диффузионный слой неоднородный и состоит преимущественно из зоны внутреннего азотирования и включений нитридов.

Для 38X2МЮА твердость материала поверхности исследованного образца составляет 780 HV 10/10, 760 HV, глубина слоя 410 мкм. При ИПА этой стали может быть достигнута и значительно более высокая твердость. Алюминий, в числе прочих, способствует развитию  $\gamma'$ -фазы с образованием  $(Fe, M)_4N$  в виде сплошного слоя или игл (пластин), расположенных по плоскостям скольжения и границам зерен на значительную глубину. Это нередко вызывает хрупкость диффузионного слоя: чем больше в стали нитридообразующих элементов, тем мельче блочная структура  $\epsilon$ -фазы. При содержании хрома более 2 % образуются нитриды легирующих элементов по схеме дисперсионного твердения [4].

Таким образом, получены результаты поверхностного упрочнения на оборудовании ионного азотирования промышленного типа образцов-свидетелей, которые подвергались обработке одновременно с деталями промышленных предприятий – заказчиков услуг. Высокие значения твердости материала поверхности изученных марок сталей и глубины слоя на образцах полностью соответствуют этим характеристикам, приданным реальным изделиям.

#### Список литературы

1. Engel, A. Physics and Technology of Electric Discharge in Gases. Vol. 2 / A. Engel, M. Shtenbek // ONTI-NKTP. Publ., Moscow, 1936. – 384 с.
2. Босяков, М. Н. Энергетические параметры процессов ионного азотирования на промышленном оборудовании / М. Н. Босяков, А. А. Козлов // Доклады БГУИР. – 2013. – № 3 (73). – С. 76–82.
3. Козлов, А. А. Азотный потенциал при ионном азотировании в плазме тлеющего разряда / А. А. Козлов // Наука и техника. Сер. 1. – 2015. – № 1. – С. 79–90.
4. Лахтин, Ю. М. Расчет влияния легирующих элементов на растворимость и диффузию азота в стали при азотировании в  $\alpha$ - и  $\epsilon$ -фазах / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, А. А. Булгач // Труды МАДИ. Азотирование в машиностроении. – 1974. – Вып. 174. – С. 42–59.

The technological parameters of ion-plasma nitriding of products made of structural and corrosion-resistant steel 40X, 38X2MЮА, 30X13 are considered. The properties of hardened layers (microhardness distribution) were studied.

*Вертинский Лев Сергеевич*, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, viartsinskiy1998@gmail.com.

Научный руководитель – *Поболь Игорь Леонидович*, доктор технических наук, заведующий лабораторией, Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, pobol.igor@gmail.com.

УДК 620.193

В. А. ГРЕМЧУК, О. А. ГРИМУТО, Д. В. ЛАВЫШ

## УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

В научной работе представлено описание лабораторной установки, разработанной для испытания металлических изделий на коррозионную стойкость методом переменного погружения в электролит согласно ГОСТ 9.308.

Коррозионная стойкость – это одно из важнейших свойств металлических изделий и конструкций [1–2]. Основным стандартом, регулирующим ускоренные методы испытания на коррозионную стойкость металлов, является ГОСТ 9.308 «Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний» [3].

Одним из наименее используемых методов в промышленности является метод переменного погружения в электролит. Данный метод достаточно информативен, однако тяжело воспроизводим. Исследование коррозионной стойкости методом переменного погружения в электролит проводится посредством чередования погружения образцов в электролит (в р-р NaCl с концентрацией, равной  $30 \pm 3$  г/дм<sup>3</sup>) и высушиванием их на воздухе.

Целью работы было разработка лабораторной установки [4], на основе ее прототипа, который был внедрен в учебный процесс ГрГУ им. Янки Купалы (акт № 03-8/101 от 08.06.2012) в рамках научно-исследовательской работы.

Разрабатываемая установка (рисунок 1) состоит из двух блоков, связанных друг с другом и присоединенных к персональному компьютеру (ПК). Первый блок содержит контроллер, управляющий шаговым двигателем (ШД), который осуществляет связь между ПК и установкой. Контроллер включает в себя схему сопряжения с интерфейсом USB для связи ПК и установки, микроконтроллер и драйвер управления ШД. Второй блок представляет собой герметичный контейнер, в котором находится электролит.

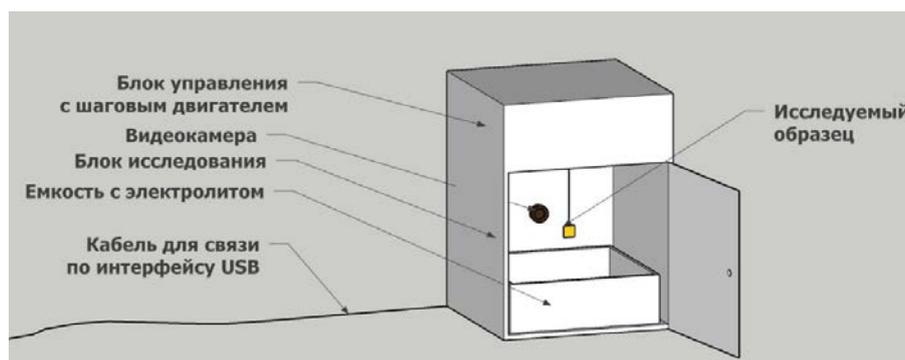


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки для коррозионных испытаний по методу переменного погружения в электролит

Программа для управления ШД написана на языке программирования C++. Она предусматривает открытие доступа к USB-порту для управления ШД, а также задает алгоритм, по которому образцы должны пребывать в растворе 10 мин, на воздухе 50 мин.

Оценка степени коррозионного поражения ржавчиной производится посредством компьютерного зрения OpenCV [5–6]. С этой целью во втором блоке установлена видеокамера, которая осуществляет съемку поверхности образца, передает полученное изображение по USB-порту на ПК, где происходит анализ площади коррозионных поражений. Анализ коррозионной стойкости при помощи данной библиотеки заключается в преобразовании полученного с камеры изображения в оттенки серого и установке фильтров для улучшения качества изображения и подавления шумов и применении дополнительных алгоритмов обнаружения границ для обнаружения коррозионных повреждений. После чего, путём преобразования данных изображений в набор математических данных, возможна разработка скрипта для получения любых конкретных данных. Внедрение технологии компьютерного зрения в процесс эксперимента может позволить значительно ускорить процесс анализа коррозионной стойкости образцов.

Разрабатываемая установка позволяет проводить испытания на коррозионную стойкость в непрерывном режиме до 15 суток. Новизна работы заключается в автоматизации процесса исследования коррозионной стойкости металлических образцов и возможности снизить влияние человеческого фактора на результаты исследования.

## Список литературы

1. Лавыш, Д. В. Влияние режимов осаждения и состава электролита на коррозионную стойкость ZnNi-покрытий / Д. В. Лавыш, Н. Г. Валько // Вестн. Гродн. гос. ун-та им. Янки Купалы. Сер. 2, Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 94–100.
2. Lavysh, D. V. Influence of ionizing radiation on the corrosion resistance of ZnNi / SiO<sub>2</sub> composite coatings / D. V. Lavysh, N. G. Valko, V. M. Anishchik, R. R. Korennoi, M. Sebok // The Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2021. – Vol. 94, № 3. – P. 633–637.
3. ГОСТ 9.308-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний: дата введения 1987-01-01 / Гос. ком. СССР по стандартам. – Изд. официальное. – М., 1985. – 21 с.
4. ISO 11130-2010 Corrosion of metals and alloys – Alternate immersion test in salt solution: дата введения 01.03.2018 / European committee for standardization. – Изд. официальное. – Лондон, 2018. – 22 с.
5. Achilleas, Matthaïou. Corrosion Detection with Computer Vision and Deep Learning [Электронное издание] / Matthaïou Achilleas // NTUA Library. – Режим доступа: <https://shorturl.at/orXZ1>. – Дата доступа: 03.03.2024.
6. Burton, B. RustSEG: Automated segmentation of corrosion using deep learning [Электронное издание] / B. Burton // ResearchGate. – Режим доступа: <https://shorturl.at/wyz11>. – Дата доступа: 03.03.2024.

This scientific work presents a description of the developed laboratory installation for testing metal products for corrosion resistance by the method of alternating immersion in an electrolyte in accordance with GOST 9.308.

*Гремчук Владислав Алексеевич*, студент физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [vlad.gremchuk@mail.ru](mailto:vlad.gremchuk@mail.ru).

*Гримута Олег Андреевич*, студент физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [Grimuto\\_OA\\_20@student.grsu.by](mailto:Grimuto_OA_20@student.grsu.by).

*Лавыш Дмитрий Валерьевич*, выпускник аспирантуры физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [demoniff@mail.ru](mailto:demoniff@mail.ru).

Научный руководитель – *Валько Наталья Георгиевна*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [n.valko@grsu.by](mailto:n.valko@grsu.by).

УДК 53.04

Б. О. ДЖАББАРОВА, Э. Ш. ХАЙТБАЕВ, Д. Р. РАДЖАПОВ,  
А. К. ХАСАНОВ, Х. ПАЙЗУЛЛАЕВА

## ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПОДЗАТВОРНОГО И ОБРАТНОГО ОКСИДНОГО СЛОЁВ НА ЭФФЕКТ САМОРАЗОГРЕВА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ БЕСПЕРЕХОДНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

В работе с помощью моделирования рассматривается влияние материалов подзатворного и обратного оксидных слоев и их комбинаций на эффект саморазогрева в беспереходных вертикальных полевых транзисторах с изолированным затвором. Моделируется зависимость температуры в центре канала транзистора от толщины как подзатворного, так и обратного оксидного слоя.

Одной из основных тенденций современной наноэлектроники все еще является уменьшение размеров полевых транзисторов с изолированным затвором (МОП транзисторы) для достижения малой потребляемой энергии. Однако основной упор делается на исследования связанные с деградационными эффектами, которые возникают при масштабировании МОП транзисторов [1; 2; 3]. В связи с этим предлагаются различные новые конструкции транзисторов или замена функциональных материалов. В частности для уменьшения короткоканальных эффектов, заметно проявляющихся в планарных MOSFET, были предложены плавниковые полевые транзисторы с изолированным затвором (FinFET) [3; 4; 5]. Затем технология изготовления FinFET была существенно упрощена и предложены беспереходные FinFET (JLFinFET), которые также обладают высоким иммунитетом против короткоканальных эффектов. В то же время как FinFET так JLFinFET основаны на структурах КНИ (SOI), результатом чего является то, что канал транзистора с обратной стороны граничит непосредственно с оксидным слоем (BOX). Это обстоятельство вызывает дополнительный деградационный эффект связанный с саморазогревом канала. Саморазогрев происходит из за относительно низкой теплопроводности обратного оксидного слоя по сравнению с полупроводниковой подложкой, используемой в планарных MOSFET. В связи с этим важным является вопрос подбора материала обратного и подзатворного оксидного слоя. Поэтому в данной работе на основе 3D моделирования рассматривается зависимость эффекта саморазогрева как от материалов оксидных слоев, так и их комбинаций. В качестве оксидных слоев

рассмотрены наиболее используемые в FinFET транзисторах диэлектрические материалы такие, как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

В данной работе проводится 3D моделирование кремниевое безпереходного FinFET транзистора, структура которого показана на рисунке 1. В качестве затвора используется TiN. Канал транзистора n-типа. Геометрические размеры различных областей транзистора и уровень легирования канала показаны в таблице 1.

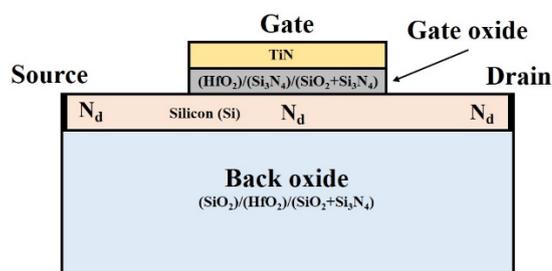


Рисунок 1 – Поперечное сечение моделируемого безпереходного FinFET транзистора

Таблица 1 – Параметры моделируемого транзистора

Параметр	Обозначение	Значение параметра
Уровень легирования канала	$N_d$	$5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (n-tip)
Уровень легирования истока и стока	$N_d$	$5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (n-tip)
Толщина подзатворного оксидного слоя ( $\text{HfO}_2$ , $\text{Si}_3\text{N}_4$ , $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ )	$t_{\text{ox}}$	$t_{\text{EOT}} = 1.0\text{--}1.5 \text{ nm}$
Толщина канала	$T_{\text{si}}$	9 nm
Ширина канала	$W_b$	22 nm
Толщина обратного оксидного слоя ( $\text{SiO}_2$ , $\text{HfO}_2$ , $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ )	$T_{\text{box}}$	10–1000 nm
Длина затвора	$L_{\text{gate}}$	10 nm

Моделирование проводилось с помощью программы TCAD Sentaurus. Для оценки эффекта саморазогрева использовалась термодинамическая транспортная модель. При этом, для учета квантовых эффектов вводилась корректировка на основе модели density gradient. В модели подвижности учитывались зависимость от уровня легирования канала и насыщение скорости носителей при высоких полях. При использовании  $\text{HfO}_2$  с высокой диэлектрической проницаемостью, в качестве подзатворного оксидного слоя учитывалась дополнительная деградация подвижности носителей на границе диэлектрик-полупроводник за счет кулоновского и фононного рассеяния.

В работе моделируется зависимость температуры решетки в центре канала от толщины как подзатворного так и обратного оксидного слоя при различных комбинациях материалов.

На рисунке 2 представлены зависимости температуры в центре канала от эквивалентной толщины подзатворного оксидного слоя при различных материалах обратного оксидного слоя.  $\text{SiO}_2$  не рассматривался в качестве подзатворного оксидного слоя так как минимальная рассматриваемая эквивалентная толщина подзатворных оксидных слоев выбиралась равной 1 nm и при такой толщине  $\text{SiO}_2$  могут наблюдаться утечки тока через затвор. На рисунке видно, что для всех рассматриваемых подзатворных оксидных материалов наблюдается слабый, но в основном монотонный спад температуры с увеличением толщины оксидного слоя. Небольшие перепады температуры связаны с изменениями тока стока при соответствующих толщинах (рис. 3), которые приводят к соответствующим изменениям генерируемого Джоулева тепла и температуры. В то же время, общая тенденция уменьшения температуры обусловлена с увеличением скорости диссипации тепла через подзатворный оксидный слой, вызванной увеличением площади границы между оксидным слоем и затвором с увеличением толщины оксидного слоя (рис. 4). Зависимость площади границы между затвором и подзатворным оксидным слоем показана на рисунке 3. Из рисунка видно, что с увеличением толщины подзатворного оксидного слоя площадь указанной границы растет линейно, что, очевидно, и вызывает монотонный спад температуры в канале.

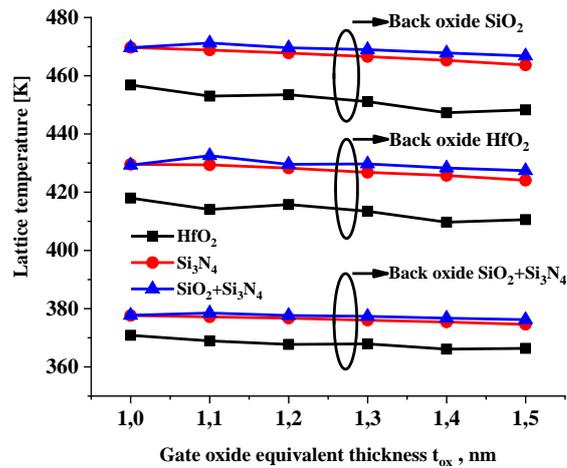


Рисунок 2 – Зависимость температуры решётки в центре канала от толщины подзатворного оксидного слоя для различного обратного оксидного слоя

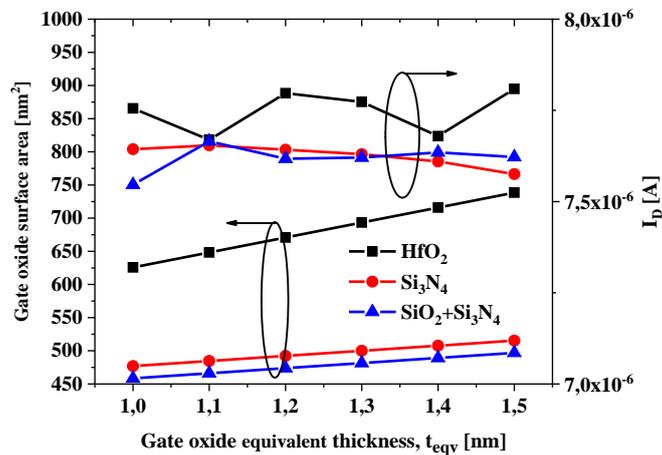


Рисунок 3 – Зависимость площади границы «подзатворный оксидный слой – затвор и тока стока» от толщины подзатворного оксидного слоя

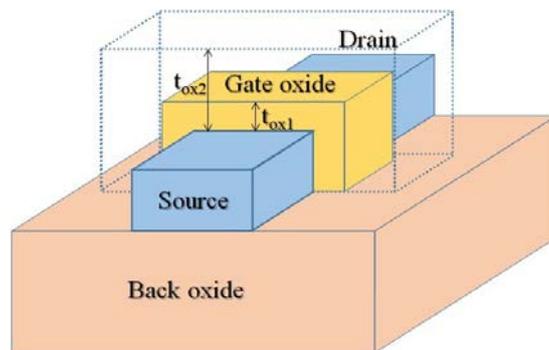


Рисунок 4 – Структура транзистора при различных толщинах подзатворного оксидного слоя

Кроме этого, из рисунка 2 видно, что более существенное влияние на температуру канала оказывает материал обратного оксидного слоя. Наибольшая температура канала проявляется при использовании  $SiO_2$  и наименьшая при использовании  $SiO_2 + Si_3N_4$  в качестве обратного оксидного слоя. Это объясняется тем, что для  $SiO_2$  теплопроводность является наименьшей и для  $Si_3N_4$  наибольшей среди рассматриваемых материалов (таблица 2).

Таблица 2 – Теплопроводность материалов оксидных слоев

Материал оксида	Теплопроводность [W/mK]
HfO <sub>2</sub>	2,3
SiO <sub>2</sub>	1,4
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	18,5

Из результатов моделирования видно, что основным материалом, существенно влияющим на результирующую температуру канала, является материал обратного оксидного слоя. Для увеличения иммунитета к эффекту саморазогрева наиболее оптимальным является комбинированный оксидный материал SiO<sub>2</sub>+Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

#### Список литературы

1. Moore G. Cramming more components onto integrated circuits, in Proc. IEEE, 86 (1998) 82–85.
2. Khakifirooz A., Antoniadis D. A. The future of high-performance CMOS: Trends and requirements, in ESSDERC, (2008) 30-37.
3. Integrated modeling of Self-heating of confined geometry (FinFET, NWFET, and NSHFET) transistors and its implications for the reliability of sub-20 nm modern integrated circuits / W. Ahn [et al.] // *Microelectronics Reliability* Vol. 81, February 2018, Pages 262-273 <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.12.034>
4. Kumar U. S., Rao V. R. A novel TCAD-based thermal extraction approach for nanoscale FinFETs, IEEE Transactions on Electron Devices 64 (3) (2017) 1404–1407, <https://doi.org/10.1109/ted.2017.2657626>.
5. Ahn W., Shin S. H., Jiang C., Jiang H., Wahab M. A., Alam M. A. Integrated modeling of self-heating of confined geometry (FinFET, NWFET, and NSHFET) transistors and its implications for the reliability of sub-20 nm modern integrated circuits, *Microelectron. Reliab.* 81 (2018) 262–273, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.12.034>.

In this paper, the influence of materials of the gate and reverse oxide layers and their combinations on the self-heating effect in non-transient vertical field-effect transistors with an isolated gate is considered using modelling. The dependence of the temperature in the centre of the transistor channel on the thickness of both the gate and reverse oxide layers is modelled.

*Джаббаров Бахор Олимбаевна*, аспирант, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, bahorbahor1989@mail.ru.

*Хайтбаев Эльдар Шакир угли*, магистрант 2-го курса, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, eldorkhaitbaev@gmail.com.

*Раджапов Дилшодбек Равшанбек угли*, магистрант 1-го курса, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, dilshodbekrajapov5@gmail.com.

*Хасанов Асрорбек Кудрат угли*, магистрант 1-го курса, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, asrorbekhasanov373@gmail.com.

*Пайзуллаева Хилола*, магистрант 2-го курса, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, payzullayeva@gmail.com.

Научный руководитель – *Атамуратов Атабек Эгамбердиевич*, DSc., профессор, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, atabek.atamuratov@yahoo.com.

УДК 53.087.47

М. К. ДУБОВЕЦ

## УСТРОЙСТВО МОНИТОРИНГА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ

Описан макет устройства для измерения показателей температуры и влажности воздуха, принцип его работы и функциональность. Устройство использовалось для тестирования применяемых технологий и алгоритмов.

Влажность воздуха – это величина, характеризующая содержание водяных паров в атмосфере Земли – одна из наиболее существенных характеристик погоды и климата. Влажность воздуха является одной из проблем, с которой человек сталкивается ежедневно. Она может наносить как моментальный урон имуществу человека, так и стать внезапной проблемой в будущем, если отсутствует контроль ее уровня. Так с течением времени проблемы вызываемые влажностью развиваются незаметно для человека. К наиболее явным проблемам, которые могут быть вызваны высокой влажностью воздуха, относятся: поломки оборудования, разрушение конструкций, порча продуктов питания, порча прочего имущества человека (книги и картонно-бумажная упаковка).

*Анализ существующих решений.* Проблема контроля уровня влажности воздуха ощущается наиболее остро в помещениях, где присутствие человека является непродолжительным или периоды между посещениями

слишком большие. Если человек находится в помещении, то он может контролировать уровень влажности самостоятельно, например, открыть окно. Этот процесс можно упростить с помощью вытяжных вентиляторов или прочих систем осушения. Однако такие системы срабатывают по достижении определенного порогового значения влажности воздуха, тем самым вызывают некоторые колебания [1; 2]. На дистанции такие колебания влажности и температуры все так же могут наносить ущерб самому помещению и имуществу человека.

Цель настоящей работы состояла в разработке макета устройства для автоматизации мониторинга показателей влажности и температуры воздуха в помещении, сбора этих данных, а также управления системой вентиляции для контроля этих показателей.

Для разработки устройства была выбрана платформа Arduino Nano – отладочная плата, полнофункциональное миниатюрное устройство на базе микроконтроллера ATmega328 (Arduino Nano 3.0) или ATmega168 (Arduino Nano 2.x), адаптированное для использования с макетными платами.

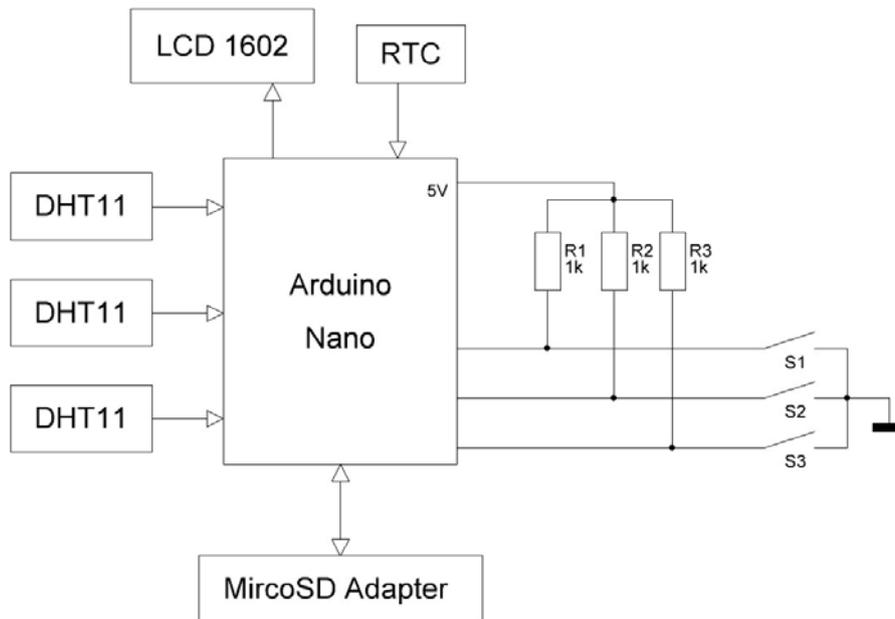


Рисунок 1 – Блок-схема устройства

**Алгоритм работы устройства.** Мониторинг показателей влажности и температуры воздуха происходит с определенной частотой, где опорой является отдельный модуль часов реального времени (RTC). Микроконтроллер производит сканирование датчиков в помещении и записывает временную метку в строковую переменную. Метка содержит дату и время сканирования. Измерения температуры окружающей среды и влажности производится при помощи комбинированных датчиков DHT11 применяемых для Arduino проектов. Такие датчики позволяют выполнять измерения температуры в диапазоне от 0 °C до 50 °C с допуском  $\pm 2$  °C и влажности в диапазоне 20 % – 95 % с допуском  $\pm 5$  % [3]. В случае, если датчик исправен, то в строковую переменную записываются полученные значения. В противном случае – сообщение об ошибке. По завершении сканирования происходит запись полученной строковой переменной в файл на карте памяти.

**Функциональность устройства.** Базовая задача полученного устройства – сбор данных о показателях влажности и температуры воздуха, а так же их колебаний в помещении. Для взаимодействия с устройством необходима другая ЭВМ. С целью расширения функциональности конечного устройства могут быть добавлены различные органы ввода и вывода информации. Наличие жидкокристаллического экрана формата 1602 или 1604, а также набора кнопок или энкодера позволяет расширить возможность настройки параметров работы устройства без применения других ЭВМ, тем самым упрощая калибровку устройства и увеличивая его самостоятельность.

Собранные данные могут быть извлечены из устройства для дальнейшего анализа влияния внешних факторов и оценки эффективности системы вентиляции. Также устройство может управлять системой вентиляции или же быть источником управляющего сигнала для другой системы.

#### Список литературы

1. Реле контроля влажности RH-1 [Электронный ресурс] // fif.by. – Режим доступа: <https://fif.by/catalog/rh-1>. – Дата доступа: 28.02.2024.

2. Реле контроля влажности RHT-2 [Электронный ресурс] // fif.by. – Режим доступа: <https://fif.by/catalog/rht-2>. – Дата доступа: 28.02.2024.

3. DHT11 Datasheet [Электронный ресурс] // alldatasheet.com. – Режим доступа: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1440068/ETC/DHT11/194/3/DHT11.html>. – Дата доступа: 28.02.2024.

The article describes a device for measuring temperature and humidity, its operating principle and functionality. The device was used to test the technologies and algorithms used.

*Дубовец Максим Константинович*, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [dubovets\\_mk1\\_20@student.grsu.by](mailto:dubovets_mk1_20@student.grsu.by).

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [german@grsu.by](mailto:german@grsu.by).

УДК 53.082.64

Г. А. КАСАПИДИ

## РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ НА БАЗЕ NI ELVIS С ТЕМПЕРАТУРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ<sup>1</sup>

В работе представлен разработанный лабораторный стенд для измерения вольт-амперных характеристик полупроводникового прибора при изменении температуры. Для тестирования целой линейки различных полупроводниковых диодов в измерительной схеме используется микросхема – аналоговый ключ ADG252, а температура исследуемого элемента контролируется с помощью элемента Пельтье.

В настоящее время технология виртуальных приборов для электроники активно используется для симулирования различных технологических процессов и работы физических приборов, а также широко распространена технология диагностики на базе виртуальных приборов, и признанным мировым лидером здесь является компания National Instruments. Моделируемая система организуется в виде программной модели некоторого реально существующего или гипотетического прибора, причём программно реализуются не только средства управления (рукоятки, кнопки, лампочки и т. п.), но и логика его работы.

NI ELVIS – это многофункциональная система, предназначенная для тестирования электрических схем различного применения, которая, в том числе, может быть использована для исследования различных свойств полупроводниковых приборов. Среди них вольт-амперная характеристика (ВАХ) является самой первой и базовой [1]. Существует большое количество приборов, построенных на базе NI ELVIS для построения ВАХ, однако в этих устройствах все измерения проводятся при одной и той же температуре.

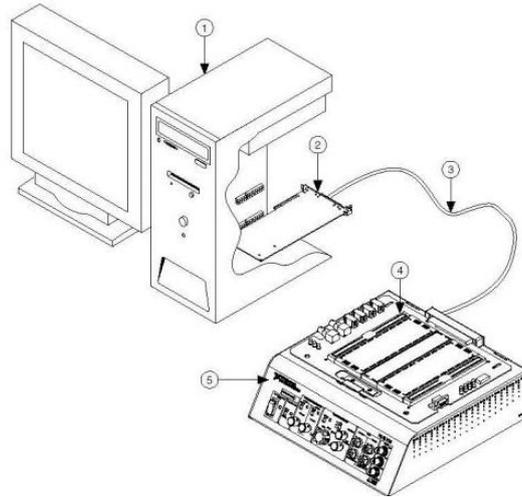
Аппаратная часть комплекса NI ELVIS состоит из рабочей станции и макетной платы. Плата ввода/вывода DAQ и рабочая станция вместе образуют законченную лабораторную установку в стандартной комплектации (рисунок 1). Для реализации системы измерения ВАХ диодов в дополнение к стандартной комплектации также были изготовлены отдельная плата для элементов, чьи температурные характеристики предполагается исследовать, нагревательная система в виде элемента Пельтье, установленного на радиатор, и контур, отвечающий за коммутацию исследуемых элементов, собранный на макетной плате NI ELVIS, который содержит в себе микросхему – аналоговый ключ.

Характеристики платы ввода/вывода NI PCI 6251 DAQ[1]:

- 1) 16 аналоговых входов;
- 2) разрешение аналоговых входов – 16 бит;
- 3) 2 аналоговых выхода;
- 4) разрешение аналоговых выходов – 16 бит;
- 5) максимальная скорость обновления данных – 2,8 мс/с (время на одно сканирование);
- 6) размах выходного напряжения –  $\pm 10$  В,  $\pm 5$  В;
- 7) 24 КМОП/ТТЛ линии цифрового ввода/вывода;
- 8) количество выходов счетчика – 8.

Макетная плата предназначена для монтажа электронных схем. Имеет разъемы BANANA и BNC. Макетная плата – съемная, что позволяет менять тип проводимой лабораторной работы, просто сменив макетную плату с уже собранной на ней схемой.

<sup>1</sup>Исследование проводилось в рамках проекта № FSEE-2024-0005 (государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00003-24-00).



**Рисунок 1 – Схема размещения компонентов измерительной системы NI ELVIS на базе настольного компьютера:**  
**1 – настольный компьютер; 2 – DAQ-устройство серии M с 68 контактным разъемом;**  
**3 – экранированный кабель для устройств серии M; 4 – настольная рабочая станция NI ELVIS**

Измерения параметров (разности потенциалов) схемы, собранной на макетной плате NI ELVIS можно проводить по физическому каналу, или же путем создания глобального виртуального канала (global virtual channel) в программе конфигураторе «Measurement and Automation Explorer». Различия в типах каналов заключаются в возможности изменения специфических параметров канала:

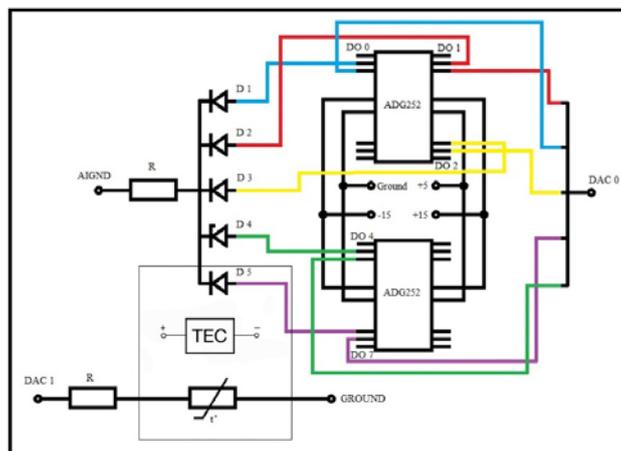
1) тип источника измеряемого сигнала (заземленный RSE, незаземленный NRSE, дифференциальный Differential);

2) минимальное и максимальное значения измеряемого сигнала;

3) масштаб измеряемого сигнала (линейный, полиномиальный, табличный).

В случае измерения разности потенциалов путем простого указания номера физического канала LabVIEW будет использовать значения этих специфических параметров, установленные по умолчанию. Это может быть не всегда удобно, плюс, есть вероятность, что некто эти значения поменяет, и вы об этом не будете подозревать. Поэтому для измерений в LabVIEW указывается не физический канал, а созданный в программе MAX глобальный виртуальный. Такой виртуальный канал содержит настройки, которые нужны именно для данного типа измерений – то есть вы спасены от случая их непредвиденного изменения. Задаются эти параметры во время создания канала в программе MAX [2].

Самым простым способом измерения ВХХ является подключение двухполюсника к любому прибору – анализатору ВХХ. Например, использовать поставляемый вместе с комплексом NI ELVIS виртуальный прибор «анализатор ВХХ», однако данный прибор нельзя модифицировать. А так как его функциональность ограничена только измерением ВХХ одного двухполюсника, было принято решение разработать собственную измерительную схему и написать собственное программное обеспечение. Разработанная измерительная схема представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Разработанная измерительная схема лабораторного стенда**

Между аналоговым выходом DAC0 и заземлением AIGND устанавливается какое-либо значение разности потенциалов. Затем измеряется падение напряжения на резисторе. Замер падения напряжения ведется по двум каналам в режиме работы «дифференциальный». То есть измеряется значение потенциала в двух точках, затем, одно значение вычитается из другого. Через падение напряжения на постоянном резисторе рассчитывается ток, протекающий в цепи. Вычитанием из значения напряжения, установленного между точками DAC0 и AIGND, значение падения напряжения на нагрузочном резисторе, получается значение напряжения на исследуемом диоде (или любом другом двухполюснике). Переключение между диодами осуществляется с помощью микросхемы – ключа. Для кремниевого диода предусмотрен регулируемый температурный режим. Роль теплоотвода и нагревателя играет термоэлектрический модуль коммерческой серии TEC-12706. В качестве датчика температуры выступает терморезистор. Для контроля температуры используется ПИД-регулятор. Лицевая панель прибора представлена на рисунке 3.

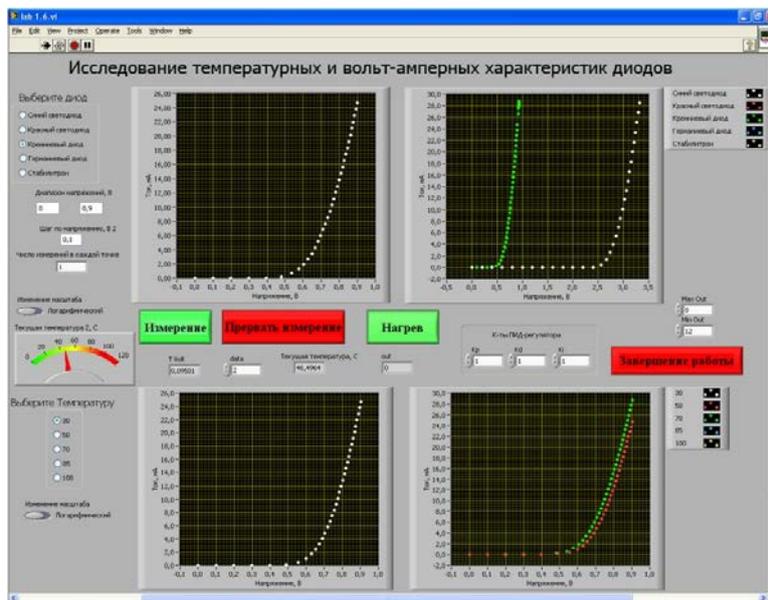


Рисунок 3 – Лицевая панель прибора измерения ВАХ

Большим преимуществом данного прибора является возможность сравнить и проанализировать статические и дифференциальные характеристики исследуемого прибора и их влияние на его работу на основе расчета в ПО LabVIEW. С помощью численного дифференцирования экспериментальной ВАХ [4] в рамках одного пользовательского интерфейса можно оценить дифференциальное сопротивление диода, сэкономив тем самым время на обработку экспериментальных данных. На рисунке 4 приведены измеренная ВАХ кремниевого выпрямительного диода при прямом смещении и рассчитанное для него дифференциальное сопротивление.

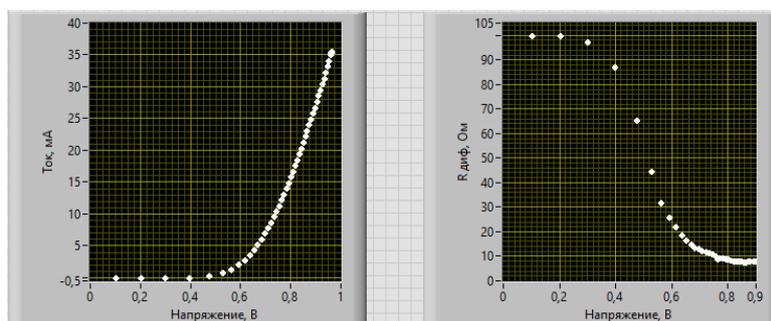


Рисунок 4 – Расчёт дифференциального сопротивления диода по его экспериментальной ВАХ в ПО LabVIEW

Разработанный лабораторный стенд значительно расширил возможности NI ELVIS, сделал эксперимент более эффективным и информативным. Богатый инструментарий LabVIEW позволяет охватить более широкий спектр задач и характеристик, которые можно определить, что особенно важно при исследовании полупроводниковых приборов, поскольку качественное описание физических принципов работы возможно лишь при рассмотрении большого числа параметров в комплексе.

## Список литературы

1. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М. : Физматлит, 2015. – 544 с.
2. NI ELVIS User Manual. – 2006. – 96 p.
3. LabVIEW User Manual. – 2007. – 370 p.
4. Зубков, В. И. Компьютерные технологии в научных исследованиях : учеб. пособие / В. И. Зубков, А. В. Соломонов. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006. – 88 с.

This article presents the prototype of a laboratory setup for investigating the parameters of semiconductor devices, describes the experimental measuring circuit, and control software.

*Касапиди Георгий Александрович*, студент 4-го курса, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация, gkasapidi@mail.ru.

Научный руководитель – *Яковлев Георгий Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Российская Федерация, gy@etu.ru.

УДК 629.7.018

М. А. ЛОБАЧ

**МАКЕТ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЁРА**

Представлено описание разработанного макета авиационного тренажёра на базе джойстика Logitech Attack 3. Работа тренажёра реализована с помощью программы Microsoft Flight Simulator 2004. Подключение блока управления осуществляется через порт USB персонального компьютера. Рассмотрены конструктивные особенности макета, достоинства и недостатки.

Авиационный тренажёр предназначен для изучения основ электроники, самообразования обучающихся инженерных специальностей, а так же может быть полезен для приобретения практических навыков пилотирования в авиашколах.

В ходе анализа рынка было выявлено несоответствие джойстиков системам управления настоящего самолёта [1]. В джойстиках ограниченная площадь основания и требование симметричности конструкции привели к тому, что регулятор скорости слишком маленький и заменён потенциометром, ручка управления самолётом короткая, отсутствуют педали руля направления. Была проведена кардинальная переделка джойстика: установлены педали руля направления и изменена в сторону увеличения величина отклонения ручки. На педали и ручку управления установлены пружины, имитирующие аэродинамические нагрузки на рулевые поверхности, возникающие в полёте. Тренажёр производится на базе джойстика Logitech Attack 3, так же используются различные материалы для изготовления корпуса и технических механизмов. Себестоимость тренажёра получается достаточно бюджетной.

Макет состоит из платформы, на которой установлена ручка, педали руля направления и блока управления, отдельно к блоку управления подведён РУД (рычаг управления двигателем). Блок управления подключается через порт USB к РС (персональный компьютер). Схема макета показана на рисунке 1.

Блок управления совместим с ПК и МАК, интерфейс подключения USB. Имеет 11 программируемых кнопок, часть из которых, для удобства, выведены на ручку управления самолётом. В блоке установлена плата от Logitech, её конструктивные особенности не разглашаются. Logitech – микросхема, созданная швейцарской компанией, которая является производителем компьютерной периферии. Подобно всем недорогим тренажёрам, данная модель является резисторной. Резисторные джойстики в теории должны уступать оптическим, однако, при сегодняшнем уровне развития технологии, на практике отличия найти достаточно сложно. К сожалению, специалисты Logitech реализовали потенциал резисторной технологии не полностью: точность по всем осям составляет 256 единиц.



Рисунок 1 – Схема макета

Ручка управления самолётом с помощью удлиняющей трубки вынесена на 0.4 м над уровнем блока управления, что позволяет изменить в сторону увеличения величину отклонения ручки. Это позволяет приблизиться к реальной конструкции ручки в самолёте. Все коммуникации проведены внутри удлиняющей трубки. Ручка представляет собой удобную рукоятку поддерживающую руку, что позволяет снять дополнительное напряжение с мышц руки. Имеется 3 программируемые кнопки сверху ручки, а также программируемый курок, который в основном используется для включения стояночного тормоза. Внутри блока управления установлена одиночная центрирующая пружина, которая позволяет удерживать ручку в центре, её положение регулируется, для установки ручки в различные положения. Так же имеется возможность устанавливать дополнительные пружины для имитации аэродинамических нагрузок. Данный тренажёр напоминает штурвал более старых моделей самолётов, но простота конструкции позволяет в дальнейшем сделать его модульным, тогда меняя штурвалы появится возможность симулировать разные модели самолётов.

Педали руля направления были разработаны с использованием полной концептуальной переработки, они представляют собой металлический каркас определённой конструкции, позволяющей точно фиксировать движения с помощью потенциометра установленного снаружи блока управления. Конструктивно педали представляют собой упрощённую схему педалей руля направления настоящего самолёта. Основные части руля направления: ножные ремни, стремя, центральный кронштейн, задняя труба, звено, передняя труба, уши для крепления тяг, подводимых к потенциометру.

Рычаг управления двигателем представляет собой ручку, которая подключена к потенциометру, ручка способна фиксироваться в любых положениях, позволяя поддерживать определённую частоту оборотов двигателя.

Макет подключается к персональному компьютеру через порт USB, на компьютере заранее должна быть установлена какая-либо версия приложения MicrosoftFlightSimulator [2] или его аналоги (имеющие возможность подключения джойстика). Данная программа относится к начальному уровню сложности. Характеристика компьютера должны соответствовать требованиям приложения. Окно программы управления показано на рис. 2.



Рисунок 2 – Окно программы управления

Представленный тренажёр позволяет научиться управлять самолётом во время взлёта, в процессе полёта, пилотажа, во время посадки. Компьютер контролирует образы точно так же, как измерительные приборы в самолёте. Все факторы, влияющие на полёт, такие как погодные условия, особенности местности, длина взлётной полосы, яркость и угол падения солнечных лучей и тени, учитываются компьютером. Компьютер вычисляет так же скорость, направление движения, техническое состояние самолёта. Симуляция проводится с целью в точности воспроизвести условия реального полёта (погодные условия, промежутки времени, а так же большую часть физических законов) [3], чтобы обучающийся мог получить опыт управления. Особо сложные условия, например приземление во время грозы, могут быть симулированы и повторены ровно столько, сколько это необходимо.

После подключения тренажёра и запуска приложения необходимо произвести настройку, так как все заготовки для джойстиков в приложении находятся в середине диапазона. Так же необходимо настроить чувствительность и пустые зоны (указывает, сколько «Мертвого места» находится в определенном положении

игрового центра). Немаловажным является наличие на экране большинства авиационных приборов, что позволяет научиться использовать их во время полёта и понять их особенности.

Основными достоинствами тренажёра является безопасность обучения, среда разработана для избежания реальных опасностей; простота освоения; экономические преимущества (дешевизна изготовления, исключаются траты на техническое обслуживание); экологические преимущества (снижение выбросов, отсутствие шумового загрязнения), по сравнению с обучением на настоящих самолётах; способность коммуницировать с большинством авиационных приложений; конструктивная схожесть с системой управления настоящего самолёта. Как недостаток можно отметить, что обучение на тренажёре не заменит настоящую лётную практику, и для полноценного обучения необходимо совмещать эти технологии.

В стадии идеи находится собственная программа, которая сможет учитывать намного больше факторов (для приближения тренировочного полёта к реальности), по сравнению с её аналогами в интернете. Так же планируется сделать тренажёр модульным, что позволит изучать особенности различных классов самолётов. Тренажёр может использоваться в объединениях по интересам «Авиамоделирование», так же в авиационных учебных центрах, как устройство лёгкое для понимания и освоения.

Следует отметить, что данный проект был представлен автором на конкурсе «100 идей для Беларуси», и стал победителем на городском этапе, а также был отмечен специальным призом на областном этапе [4].

#### Список литературы

1. Yandex. Market. Поиск товаров (джойстик для авиасимулятора) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://market.yandex.by/search?text=джойстик%20для%20авиасимулятора%20купить&allowCollapsing=1&local-offers-first=0>.
2. Microsoft Flight Simulator. Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/MicrosoftFlightSimulator>. – Дата доступа: 18.03.2023.
3. Studfile.net. Влияние параметров атмосферы на полет самолетов и вертолетов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/8888651/page:4>.
4. В Гродно прошел областной этап инновационного проекта БРСМ «100 идей для Беларуси» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://grodnonews.by/news/obrazovanie/v\\_grodno\\_proshel\\_oblastnoy\\_etap\\_innovatsionnogo\\_proekta\\_brsbm\\_100\\_idey\\_dlya\\_bielarusi.html?ysclid=lfdvv0jyou82506033](https://grodnonews.by/news/obrazovanie/v_grodno_proshel_oblastnoy_etap_innovatsionnogo_proekta_brsbm_100_idey_dlya_bielarusi.html?ysclid=lfdvv0jyou82506033). – Дата доступа: 18.03.2023.

The article presents a description of the developed model of an aviation simulator based on the Logitech Attack 3 joystick. The simulator is implemented using the Microsoft Flight Simulator 2004 program. The control unit is connected via the USB port of a personal computer. The design features of the layout, advantages and disadvantages are considered. The aviation simulator is intended for studying the basics of electronics, self-education of students in engineering specialties, and can also be useful for acquiring practical piloting skills in aviation schools.

*Лобач Михаил Андреевич*, студент 3-го курса физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [misha.lobach.04@mail.ru](mailto:misha.lobach.04@mail.ru).

*Научный руководитель – Жарнова Ольга Александровна*, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической физики и теплотехники физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [zharnova\\_oa@grsu.by](mailto:zharnova_oa@grsu.by).

УДК 614.876.084

В. В. МАМОНТОВА

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА МЁДА МЕТОДОМ РЕНТГЕНО-ФЛУОРИСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Окружающий нас радионуклидный мир весьма разнообразен. В нем есть постоянные (стабильные) атомы и их антропогенные собратья. По пищевым цепочкам они попадают вместе с едой и водой в организм человека, нанося ему вред.

Одним из таких элементов является радиоактивный цезий, который легко всасывается в желудочно-кишечном тракте, свободно циркулирует по всему телу, принимая активное участие в обмене веществ. В обменных процессах цезий подобен калию [1], причем он легко растворяется в биологических жидкостях, что приводит к облучению организма [2]. Одним из регионов, куда выпал радиоактивный цезий является Лунинецкий район Брестской области.

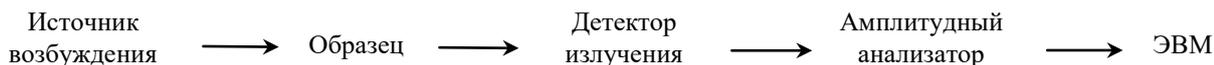
**Цель исследования.** Целью настоящего исследования является изучения элементного состава пчелиного меда спустя 37 лет после Чернобыльской катастрофы в Лунинецком районе, территория которого была загрязнена радиоактивным цезием.

**Материалы и методы.** Образцы меда для исследования взяты с территории, которая, согласно статьи 5 Закона Республики Беларусь от 26 мая 2012 года № 385-3 «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС», является зоной проживания с

периодическим радиационным контролем с плотностью загрязнения почв радионуклидами цезия-137 либо стронция-90 или плутония-238, 239, 240.

Химический состав меда весьма сложен и разнообразен, в нем содержится более 300 веществ, включая минеральные вещества. Состав меда отличается от состава нектара, собираемого пчелами. Минеральные соединения попадают в продукт с выделениями нижнечелюстных желез пчелы. Содержание элементов в меде (зольность) в среднем составляет 0,3 %. Минеральные вещества являются важными компонентами физиологических и биохимических процессов, регулируют обмен веществ.

Методом исследования является рентгено-флуоресцентная спектроскопия. Исследование проведено на приборе ElvaX компании «Элватех». Метод основан на взаимодействии рентгеновского излучения с анализируемым веществом. Система состоит из спектрометра и компьютера, на который выводятся результаты анализа.



В основе метода лежит исследование рентгеновского излучения, прошедшего через предлагаемый образец из меда. Образец помещается в кюветодержатель, где подвергается электромагнитному воздействию (рентгеновские лучи). Вторичное рентгеновское излучение, которое и называется флуоресценцией, проникая за пределы кюветодержателя, регистрируется твердотельным ионизационным детектором.

После усиления и оцифровки сигнала спектрометрическим устройством, он передается на управляющий компьютер.

С помощью данного метода удалось выделить 28 элементов, которые были разделены на 2 основные группы: эссенциальные (важные для организма) и неэссенциальные (значимость которых в настоящее время либо не доказано, либо они являются токсичными, но в организме в той или иной степени присутствуют).

**Результатом** исследований является значения концентраций элементов в пробе. Для дальнейшего изучения необходимо провести пересчет концентрации на 100 г продукта. Высчитывается масса элемента в 100 г исследуемого продукта по формуле:

$$m_{100}(X) = \frac{m_{\text{пр}}(X) \times 100}{m_{\text{пробы}}} \quad (1)$$

где  $m_{100}(X)$  – масса элемента в 100 г исследуемого продукта,

$m_{\text{пр}}(X)$  – масса элемента в пробе,

$m_{\text{пробы}}$  – масса исследуемого образца.

Согласно методике выполнения измерений массовой доли химических элементов в пробах, некоторыми значениями можно пренебречь. В таблице 1 представлены эссенциальные элементы, находящиеся в образце меда.

Таблица 1 – Эссенциальные элементы

Элемент	Массовая доля в 100 г продукта, мг
Ag	0,095818
Cl	93,44653
Cu	0,502202
K	42,84642
Ca	8,098324
S	90,54034785

Из полученных данных следует, что наибольшее количество элементов в пробе составляет Cl, который участвует в регуляции осмотического давления в клетках и тканях организма. К способствует выведению жидкости из организма, а также играет большую роль во внутриклеточном обмене. S – является необходимым структурным компонентом некоторых аминокислот, витаминов, а также входит в состав инсулина [3]. Остальные элементы содержатся в небольших количествах.

В таблице 2 представлены неэссенциальные элементы, находящиеся в образце меда.

Таблица 2 – Неэссенциальные элементы

Элементы	Массовая доля в 100 г продукта, мг
Ba	28,9475
As	0,053585214
Hg	0,662413
Pb	0,78634
Zr	0,180737

Из приведенных данных, видно, что в меде из неэссенциальных элементов наибольшее значение принадлежит Ba.

Учитывая, что пасека располагается на территории, загрязнённой радиоактивным цезием (1986 г. ЧАЭС), можно предположить, что источником Ba в образце меда является радиоактивный распад цезия.



Изотопы бария – разновидности химического элемента бария, имеющие разное количество нейтронов в ядре. Известны изотопы бария с массовыми числами от 114 до 153. Природный барий состоит из смеси семи изотопов. Шесть из них являются стабильными: 132, 134, 135, 136, 137, 138.

Барий является токсичным элементом. Он поражает костную ткань, костный мозг, печень и нервную систему. Все соединения бария (иск. сульфат бария) являются токсичными, но тем не менее барий содержится в организме взрослого человека около 20 мг, среднесуточное поступление лежит в пределах 0,3–1 мг [4]

Всемирная организация здравоохранения рекомендует ПДК бария на 1 литр воды не более 0.7 мг/л. При ежедневном употреблении до 3 литров воды в сутки человек будет накапливать в организме в среднем 2.1 мг бария. Для расчета поступления возможного количества бария (с учетом известного допустимого предела) вместе с медом будем исходить из того, что в 100 граммах меда из Лунинецкого района Брестской области содержится 28.9 мг бария. Таким образом с учетом ежесуточного допустимого поступления в организм можно употреблять не более 7.3 грамма данного меда. Учитывая плотность меда в среднем 1.45 г/см<sup>3</sup>, получается не более 5 миллилитров свежего меда (что приблизительно соответствует объему 1 чайной ложки).

Таким образом:

1. Конечным продуктом распада радиоактивного цезия в образцах меда из Лунинецкого района является барий.

2. Количество употребляемого меда из Лунинецкого района Брестской области в сутки не должно превышать одну чайную ложку в свежем виде.

#### Список литературы

1. Матюхин, В. А. Экологическая физиология и радиационный фактор / В. А. Матюхин, А. Н. Разумов. – М. : Медицина, 2003. – 512 с. : илл.
2. Шеметков, М. Ф. Продукты пчеловодства и здоровье человека / М. Ф. Шеметков, Д. К. Шапиро, И. К. Данусевич. – Минск : Ураджай, 102 с.
3. Мархоцкий, Я. Л. Основы радиационной безопасности населения : учеб. пособие / Я. Л. Мархоцкий. – 2-е изд., стереотип. – Минск : Вышэйшая школа, 2014. – 224 с. : ил.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU99107408A/ru>.

The radionuclide world around us is very diverse. It contains permanent (stable) atoms and their anthropogenic counterparts. Through food chains they enter the human body along with food and water, causing harm to it.

*Мамонтова Вероника Викторовна*, студент 4-го курса специальности «Производство продукции и организация общественного питания» факультета биологии и экологии, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Жарнова Валентина Васильевна*, кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры технологии, физиологии и гигиены питания факультета биологии и экологии, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [zharnova\\_oa@grsu.by](mailto:zharnova_oa@grsu.by).

УДК 614.876.084

В. В. МАМОНТОВА

## ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПЧЕЛИНОГО ВОСКА СПУСТЯ 37 ЛЕТ ПОСЛЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ КАТАСТРОФЫ В ЛУНИНЕЦКОМ РАЙОНЕ

На современном этапе 23 % территорий Беларуси (46 тыс. км<sup>2</sup>) с 3668 населенными пунктами оказались загрязненными (плотность загрязнения цезием-137 более 1 Ки/км<sup>2</sup>).

Трансурановыми элементами (плутоний-238, -239, -240, америций-241) загрязнена часть Гомельской области, а также Лунинецкий район Брестской области. Согласно проведенным исследованиям после аварии на ЧАЭС был выявлен радиоактивный элемент Cs [1].

В течении долгого времени, согласно государственным данным, проводились реабилитационные мероприятия, направленные на снижение уровня радиоактивности.

Целью нашего исследования является изучение элементного состава пчелиного воска спустя 37 лет на загрязнённых ранее территориях Лунинецкого района.

Образцы воска для исследования взяты с территории, которая, согласно статьи 5 Закона Республики Беларусь от 26 мая 2012 года № 385-3 «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС», является зоной проживания с периодическим радиационным контролем с плотностью загрязнения почв радионуклидами цезия-137 либо стронция-90 или плутония-238, 239, 240.

Воск – второй по значению продукт пчеловодства. Он вырабатывается восковыми железами рабочих пчел [2]. Пчелы используют воск для построения сот. Пчелиный воск активно используется в косметологии и промышленности. В состав воска входят более 15 разных химических соединений. Основными являются: сложные эфиры (70–75 %), свободные жирные кислоты (12–15 %), углеводороды (11–17 %), вода (до 2,5 %), а также ароматические, красящие, минеральные и другие вещества, которые обуславливают его цвет и приятный запах. Молодая пчела в поисках нектара может улететь от улья на расстояние от 2-х до 8-ми км. Собранный нектар пчела помещает в соты [3].

Нектаропродуктивность растений зависит от целого ряда экологических условий и биологических особенности растений. Поэтому в состав нектара и в последующие продукты его переработки входят различные элементы. Состав и качество продуктов пчеловодства зависит от территории, где находится пасака.

**Материалы и методы исследований.** Для изучения элементного состава взят воск с территории, которая подвергается периодическому радиационному контролю спустя 37 лет после аварии на ЧАЭС.

Методом исследования является рентгено-флуоресцентная спектроскопия. Исследование было проведено с помощью спектрометра ElvaX компании «Элватех». Метод основан на взаимодействии рентгеновского излучения с анализируемым веществом. Система состоит из спектрометра и компьютера, на который выводятся результаты анализа (рис. 1).

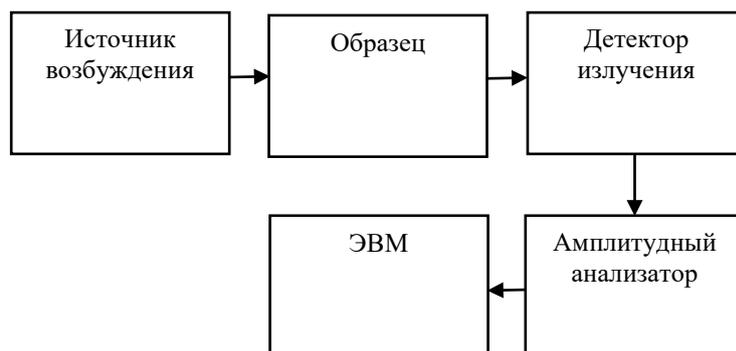


Рисунок 1 – Блок-схема рентгено-флуоресцентного спектрометра

Источник возбуждения представляет собой рентгеновскую трубку, генерирующую электромагнитное излучение. Излучение облучает образец, помещенный в кюветодержатель. Флуоресценция – вторичное рентгеновское излучение – проникает за пределы кюветодержателя, регистрируется твердотельным ионизационным детектором. Спектрометрическое устройство усиливает и оцифровывает сигнал и передает его на управляющий компьютер.

Результаты исследования приведены в таблице 1 и таблице 2.

Таблица 1 – Содержание эссенциальных элементов

Элемент	Массовая доля в 100г продукта, мг	Массовая доля, мг/кг
Ag	0,314845	0,000315
Cl	81,48972	0,014362
Cr	0,173898	0,08149
Cu	12,48453	0,000174
Fe	21,54745	0,012485

Таблица 2 – Содержание неэссенциальных элементов

Элемент	Массовая доля в 100г продукта, мг	Массовая доля, мг/кг
Ga	0,479684	0,00048
Hg	0,623196	0,000623
Pb	1,088609	0,001089
Y	0,355814	0,000356
Zr	0,662482	0,000662

Из выше приведённых данных видно, что радиоактивного цезия и продуктов его конечного распада радиоактивной цепочки (Ba) не обнаружено.

Значениями неэссенциальных (токсичных) элементов, приведенных в таблице 2, можно пренебречь, так как они ничтожно малы, согласно методике выполнения измерений массовой доли химических элементов в пробах.

В пчелином воске, собранном на территории Лунинецкого района Брестской области, спустя 37 лет после катастрофы на ЧАЭС радиоактивного цезия не обнаружено.

Наличие неэссенциальных элементов (токсичных) ничтожно мало, что позволяет использовать воск с данной территории в промышленных, косметических и медицинских целях.

#### Список литературы

1. Мархоцкий, Я. Л. Основы радиационной безопасности населения : учеб. пособие / Я. Л. Мархоцкий. – 2-е изд., стереотип. – Минск : Вышэйшая школа, 2014. – 224 с. : ил.
2. Мархоцкий, Я. Л. Советы терапевта. Гигиена питания / Я. Л. Мархоцкий. – Минск : Выш. шк., 2011. – 239 с.
3. Младенев, С. Мед и медолечение / С. Младенев ; пер. д-ра Т. И. Яневой. – София : Земиздат, 1974. – С. 16–17.

At the present stage, 23 % of the territories of Belarus (46 thousand km<sup>2</sup>) with 3668 settlements turned out to be contaminated (the density of contamination with cesium-137 is more than 1 Ci/km<sup>2</sup>).

*Мамонтова Вероника Викторовна*, студент 4-го курса специальности «Производство продукции и организация общественного питания» факультета биологии и экологии, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Жарнова Валентина Васильевна*, кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры технологии, физиологии и гигиены питания факультета биологии и экологии, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, zharnova\_oa@grsu.by.

УДК 53.087.47

В. Е. МЕЩЕРЯКОВ

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ATMEGA 328 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОПАСНЫХ ГАЗОВ В ВОЗДУХЕ

Приведена разработка программно-аппаратного комплекса на основе микроконтроллера Atmega 328 для измерения концентрации опасных газов в воздухе.

Данная работа является актуальной, поскольку полупроводниковые датчики широко применяются в различных областях, и полученный опыт в рамках данной курсовой работы может быть применен для оптимизации их использования в разнообразных сферах. Датчики MQ-2, MQ-7 и MQ-9 предназначены для обнаружения различных вредных газов, таких как дым, пропан, метан, аммиак, углекислый газ, угарный газ, а также другие газообразные вещества. Измерение концентрации указанных газов имеет существенное значение для обеспечения безопасности помещений или окружающей среды.

Объектом исследования данной работы является анализ возможностей и ограничений газовых датчиков, а также изучение их характеристик и поведения. Для достижения поставленной цели был разработан ряд задач, включающих в себя изучение существующих газовых датчиков, их принципов функционирования, а также анализ методов их подключения к микроконтроллеру Atmega 328 с последующим сбором данных с датчиков.

В ходе выполнения исследования осуществлялось подробное изучение принципов работы различных газовых датчиков и способы регистрации сигналов. Дополнительно, исследование включало в себя анализ технических характеристик микроконтроллера Atmega 328 и методов эффективного взаимодействия с газовыми датчиками.

Одной из ключевых задач работы было также экспериментальное подключение газовых датчиков к микроконтроллеру Atmega 328 и последующий сбор и отображение данных.

Предметом исследования является получение выходного сигнала датчиков в зависимости от наличия в воздухе различных газов.

Целью является создание макета устройства для определения вредных газов и отображение их концентрации на дисплее при помощи газовых датчиков MQ2, MQ7 и MQ9. При выполнении работы необходимо проанализировать существующие газовые датчики и принципы их работы, изучить способы их подключения к микроконтроллеру Atmega 328 и получения данных с них.

Описание датчиков и блок схема подключения. MQ-2 – надежный датчик газа, способный обнаруживать наличие LPG, дыма, алкоголя, пропана, водорода, метана и угарного газа в воздухе. Он является одним из самых популярных датчиков газа из серии MQ и представляет собой металл-оксид-полупроводниковый датчик газа, также известный как химический резистор (пеллистор), который изменяет свое сопротивление при контакте с газом. Для измерения концентрации газа используется простая цепь делителя напряжения [2].

Датчик MQ-9 – полупроводниковый прибор, который использует изменение сопротивления тонкопленочного слоя диоксида олова SnO<sub>2</sub> при контакте с молекулами исследуемого газа. Чувствительный элемент датчика состоит из керамической трубки, покрытой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, на которую нанесен чувствительный слой диоксида олова. Внутри трубки расположен нагревательный элемент, который подогревает чувствительный слой до температуры, при которой он начинает реагировать на определенный газ. Для достижения чувствительности к различным газам используется изменение состава примесей в чувствительном слое [3].

Датчик MQ-7 – полупроводниковый газовый датчик, который обнаруживает наличие угарного газа (CO) и углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в воздухе. Принцип работы датчика основан на изменении сопротивления тонкопленочного слоя диоксида олова SnO<sub>2</sub> при контакте с молекулами определяемого газа. Чувствительный элемент датчика состоит из керамической трубки с покрытием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и нанесенного на неё чувствительного слоя диоксида олова. Внутри трубки проходит нагревательный элемент, который нагревает чувствительный слой до температуры, при которой он начинает реагировать на определяемый газ [4].

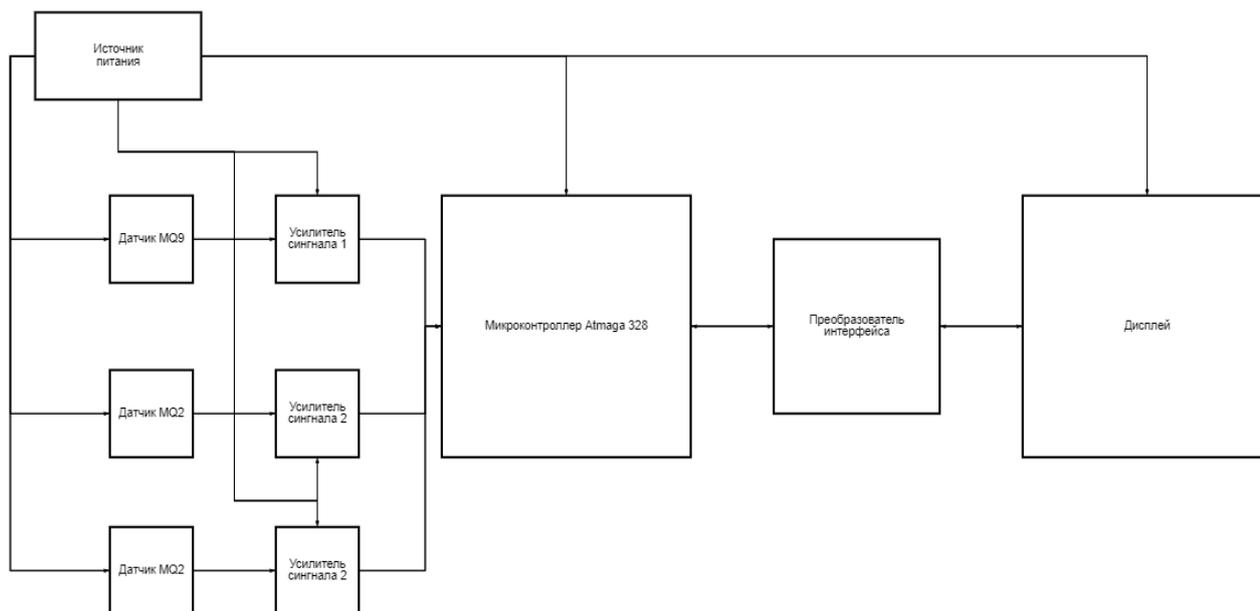


Рисунок 2 – Блок схема подключения датчиков к микроконтроллеру

Принцип работы заключается в следующем: аналоговый выход датчика подключён к аналоговому порту ввода микроконтроллера. Датчик MQ7 подключён к порту 3 (AD2), MQ9 подключён к порту 2 (AD1), в это же

время датчик MQ2 подключён к порту 1 (AD0). Сигналы с датчиков последовательно считываются, преобразовывается в цифровой при помощи аналого-цифрового преобразователя, интегрированного в микроконтроллер. Затем, полученное цифровое значение конвертируется в текстовую строку. Полученная строка отправляется на преобразователь интерфейса, после чего выводится на дисплей. На каждом из датчиков имеется потенциометр, который можно настроить на пороговое значение. В таком случае, если сигнал с датчика будет больше, чем напряжение питания, проходящее через потенциометр, с датчика можно получить цифровой сигнал о том, что концентрация газа достигла (или превысила) пороговое значение. Помимо этого, на датчике есть светодиод, который служит для этих же целей.

Таким образом, в ходе данной работы было собран макет устройства для получения данных о концентрации опасных газов в воздухе. Данные были получены с газовых датчиков MQ7, MQ2 и MQ9 при помощи микроконтроллера Atmega 328 и отображены на дисплей.

Целью работы было создание макета устройства для получения данных об окружающем воздухе на базе газовых датчиков MQ2, MQ7 и MQ9.

В результате работы был создан макет устройства использованием программно-аппаратного комплекса на основе микроконтроллера Atmega 328.

В рамках данной работы была проведена работа, направленная на получение данных с многоканальных газовых датчиков MQ2, MQ7 и MQ9 и отображение их на дисплее. Для этого был использован надежный и производительный микроконтроллер Atmega 328 и дисплей 1602. Основной целью работы было создание прототипа устройства, которое позволило бы получать данные об окружающем воздухе с высокой точностью и надежностью.

В результате проведенной работы была создан прототип устройства, который основана на программно-аппаратном комплексе, состоящем из микроконтроллера Atmega 328, дисплея 1602 и газовых датчиков MQ2, MQ7, MQ9 и соответствующих компонентов. Эта схема в перспективе может быть использована в различных областях, например, для контроля качества воздуха в помещениях или во вредных производственных условиях[3].

Кроме того, данное устройство может быть использовано в быту, для контроля за газовыми котлами.

#### Список литературы

1. Амперка [Электронный ресурс] // AmperkaWiki. – Режим доступа: <http://wiki.amperka.ru/продукты:mq2>. – Дата доступа: 03.11.2023.
2. Амперка [Электронный ресурс] // AmperkaWiki. – Режим доступа: <http://wiki.amperka.ru/продукты:mq9>. – Дата доступа: 03.11.2023.
3. Оптек [Электронный ресурс] // Optec. – Режим доступа: <https://www.optec.ru/kontrol-zagryazneniya-atmosfernogo-vozduxa.html#:~:text=Контроль%20качества%20воздуха%20-%20один,на%20человека%20и%20окружающую%20среду>. – Дата доступа: 03.11.2023.
4. Амперка [Электронный ресурс] // AmperkaWiki. – Режим доступа: <http://wiki.amperka.ru/продукты:mq7>. – Дата доступа: 03.11.2023.

The article describes the development of a hardware and software complex based on the atmega328 microcontroller for measuring the concentration of hazardous gases in the air.

*Мещераков Владимир Евгеньевич*, студент 4-го курса физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [alexanderboyko02@outlook.com](mailto:alexanderboyko02@outlook.com).

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [german@grsu.by](mailto:german@grsu.by).

УДК 621.382

Х. Ш. САПАРОВ

### АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ АМПЛИТУДЫ СЛУЧАЙНОГО ТЕЛЕГРАФНОГО ШУМА В МОП ТРАНЗИСТОРЕ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО ДИХАЛЬКОГЕНИДА МОЛИБДЕНА

Моделируется зависимость амплитуды случайного телеграфного шума от напряжения на затворе и положения единичного оксидного ловушечного заряда вдоль канала для МОП транзистора на основе двумерного дихалькогенида молибдена. Показано, что амплитуда случайного телеграфного шума возрастает при напряжениях на затворе меньших порогового. А в зависимости амплитуды случайного телеграфного шума от положения единичного заряда наблюдается монотонный спад амплитуды с удалением единичного заряда от истока вдоль канала. Такое поведение амплитуды случайного шума объясняется монослойностью канала и нанометровыми размерами единичного ловушечного заряда.

Одной из тенденций развития нанoeлектроники является масштабирование полевых транзисторов с изолированным затвором металл-оксид-полупроводник (МОП) для обеспечения минимальности потребляемой энергии и увеличения степени интеграции в интегральных схемах. В последнее время мнение мировой научной общественности на эту тенденцию разделилось на два направления. В первом направлении предполагается, что уменьшение линейных размеров МОП транзисторов до 5–10 нм является физическим пределом [1], а во втором направлении считается, что уменьшение размеров можно продолжать за счет модификации структуры транзистора или использования новых материалов в качестве канала транзистора [2].

В соответствии со вторым направлением, одним из предложений для обеспечения возможности дальнейшего масштабирования, в частности, является использование двумерных материалов в качестве канала. Одним из наиболее рассматриваемых в этом плане двумерных материалов являются дихалькогениды переходных металлов [3; 4]. В частности, уже экспериментально получены МОП транзисторы на основе двумерного  $\text{MoS}_2$  [5]. Монослои дихалькогенидов переходных металлов обладают полупроводниковыми свойствами и не имеют разорванных связей в направлении перпендикулярном к плоскости монослоя [6]. Это является одним из преимуществ при использовании двумерных материалов в качестве канала МОП транзистора по сравнению с наиболее используемым кремнием, так как в этом случае вероятность генерации граничных состояний минимальна. Однако в подзатворных диэлектрических слоях могут наблюдаться состояния обусловленные оксидными дефектами способные захватывать носители заряда, в частности единичные заряды. Эти единичные заряды могут вызвать генерацию случайных телеграфных шумов (СТШ) в стоковых токах МОП транзистора [7]. В связи с этим обстоятельством, в данной работе моделируется зависимость амплитуды СТШ от напряжения на затворе и положения оксидного единичного ловушечного заряда для МОП транзистора на основе двумерного  $\text{MoS}_2$ .

3D моделирование проводится с использованием программы TCAD Sentaurus. Структура моделируемого МОП транзистора приведена на рисунке 1. Длина затвора и ширина канала составляют 20 нм и 160 нм соответственно. Толщина подзатворного оксидного слоя  $\text{SiO}_2$  выбиралась равной 5 нм.

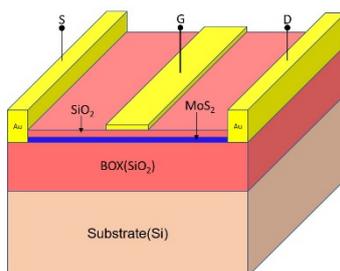


Рисунок 1 – Структура моделируемого МОП транзистора на основе двумерного  $\text{MoS}_2$

Так как в базе данных TCAD Sentaurus не включены параметры двумерного  $\text{MoS}_2$  при моделировании использовалась методика, предложенная в работе [8]. Согласно этой методике из данных, полученных в экспериментах, и теоретических оценок определялись основные параметры двумерного  $\text{MoS}_2$ , которые использовались при моделировании характеристики МОП транзистора на основе этого материала. Величины параметров использованных при моделировании с использованием диффузионно-дрейфовой транспортной модели приведены в таблице 1.

При моделировании были учтены параметры зонной структуры используемого материала, зависимость подвижности от уровня легирования и достижение насыщения при высоких полях. Эти модели были калиброваны сравнением, полученных на основе указанных выше параметров моделирования, переходных характеристик как с результатами моделирования проведенного в работе [8] так и с экспериментальными результатами, полученными в [5], и получено достаточно хорошее согласие (рис. 2).

Таблица 1 – Используемые параметры моделирования

Материал канала	Подвижность, $\mu$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	Скорость насыщения, $v_{\text{sat}}$ ( $\text{cm/s}$ )	Параметр подвижности, $\beta$	Толщина канала, (nm)	Ширина запрещенной зоны материала канала, (eV)	Эффективная масса электрона ( $m_0$ )	Относительная диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_r$
$\text{MoS}_2$	150	$1.075 \times 10^7$	1.6	0.65	1.8	0.463	3

Единичный оксидный ловушечный заряд моделировался однородно заряженной областью кубической формы согласно методике предложенной в работе [9]. Линейный размер заряженной области захватывающей единичный заряд принят равным 0.5 нм.

На основе использования указанных выше моделей и параметров моделирования получены зависимости амплитуды СТШ от напряжения на затворе при различных положениях единичного заряда вдоль канала (рис. 3a). Из результатов видно, что заметное увеличение амплитуды СТШ происходит при напряжениях ниже порогового напряжения, как и в транзисторах с объемным каналом. Это очевидно связано с более заметным влиянием единичного заряда на ток стока при его малых значениях. Но в рассматриваемом случае, где в качестве канала рассматривается двумерный материал, амплитуды СТШ являются очень высокими.

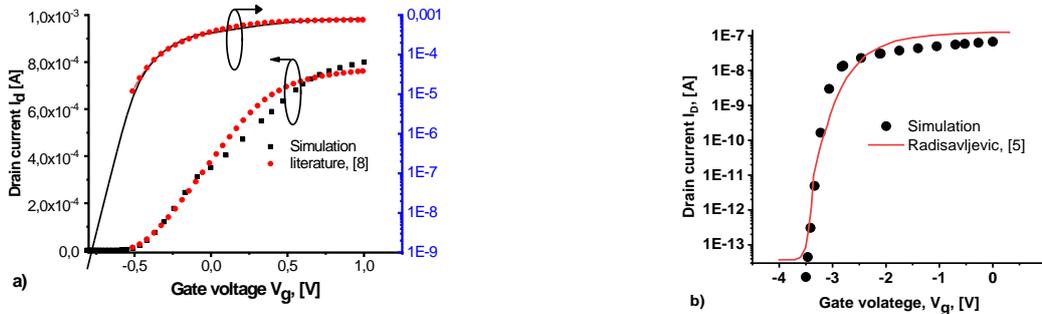


Рисунок 2 – Сравнение переходной характеристики моделируемого МОП транзистора на основе двумерного MoS<sub>2</sub> с результатами моделирования работы [8] (а) и с экспериментальными результатами работы [5]

Моделировалась также зависимость амплитуды СТШ от положения единичного оксидного ловушечного заряда вдоль канала по середине ширины. Положение единичного заряда отсчитывалось от края затвора со стороны истока. Из результатов моделирования

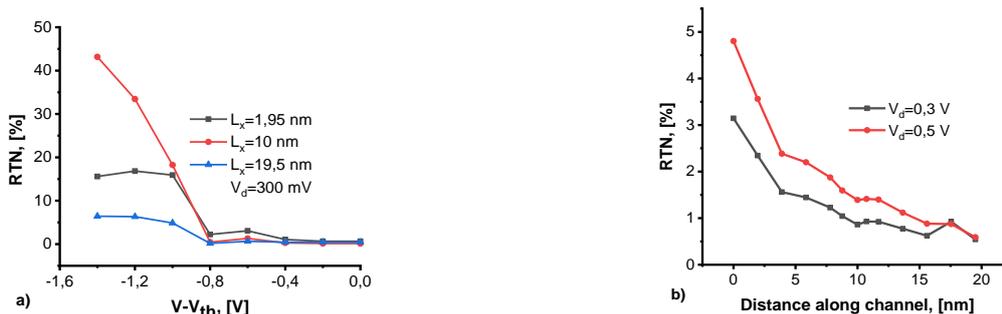


Рисунок 3 – Зависимость амплитуды СТШ от разности напряжения на затворе и порогового напряжения при различных положениях единичного заряда вдоль канала (а) и от положения единичного заряда вдоль канала при различных напряжениях на стоке (б)

Видно, что амплитуда СТШ распределена неравномерно и увеличивается при положениях единичного заряда ближе к истоку (рис. 3b). Такое распределение отличается от соответствующего распределения для объемных МОП транзисторов. Очевидно, это связано с особенностями двумерности материала, которое соответственно влияет на распределение поля вдоль канала и приводит к монотонному спаду амплитуды СТШ с удалением единичного заряда от истока.

#### Список литературы

1. Wardynski D. J. End Of Moore's Law – What's Next For The Future Of Computing. <https://www.brainspire.com/blog/end-of-moores-law-whats-next-for-the-future-of-computing>. – Published December 19, 2019.
2. Samuel K. Moore. Spectrum. Another Step Toward the End of Moore's Law Samsung and TSMC move to-5 nanometer manufacturing. <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/another-step-toward-the-end-of-moores-law> 31 May 2019.
3. Yoon Y., Ganapathi K., and Salahuddin S. How Good Can Monolayer MoS<sub>2</sub> Transistors Be?, Nano Lett. 11, 3768 (2011).
4. Fang H., Chuang S., Chang T. C., and Takei K. High-Performance Single Layered WSe<sub>2</sub> P-FETs with Chemically Doped Contacts, Nano Lett. 12, 3788 (2012).
5. Radisavljevic B., Radenovic A., Brivio J., Giacometti V., Kis A. Single-Layer MoS<sub>2</sub> Transistors, 223 Nat.(2011) Nanotechnol 6, pp. 147–150.

6. Kang J., Liu W., Sarkar D., Jena D., & Banerjee K. (2014). Computational Study of Metal Contacts to Monolayer Transition-Metal Dichalcogenide Semiconductors. *Physical Review X*, 4(3). doi:10.1103/physrevx.4.031005.
7. Campbell J. P., Yul L. C., Cheung K. P., Qin J., Suehle J. S., Oates A., and Sheng K. *Proceedings of the IEEE International Conference on IC Design and Technology (ICICDT) (IEEE, 2009)*, p. 17. Paul Girard // *Nanotechnology* 2001, 12, pp. 485–490.
8. Geng Z. Simulation of graphen nanoribbon and MoS<sub>2</sub> transistors, Master Thesis (in German), TU 225 Ilmenau (2016) pp. 3–17.
9. Atabek E., Atamuratov I., Mahkam M., Khalilloev, Ahmed Yusupov, García-Loureiro A. J. Jean Chamberlain Chedjou and Kyamakya Kyandoghere. Contribution to the Physical Modelling of Single Charged Defects Causing the Random Telegraph Noise in Junctionless FinFET. *Appl. Sci.* 2020, 10(15), 5327; doi:10.3390/app10155327.

The paper models the dependence of the amplitude of random telegraphic noise on the gate voltage and the position of a single oxide trap charge along the channel for a MOSFET transistor based on two-dimensional molybdenum dichalcogenide. It is shown that the amplitude of random telegraphic noise increases at gate voltages below the threshold. Moreover, depending on the amplitude of random telegraphic noise from the position of a single charge, a monotonous amplitude decrease is observed with the removal of a single charge from the source along the channel. This behavior of the amplitude of random noise is explained by the monolayer of the channel and the nanometer dimensions of a single trap charge.

*Сапаров Хушнудбек Шарипбаевич*, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, kushnudsaparov@gmail.com.

*Атамуратов Атабек Эгамбердиевич*, DSc., профессор, Ургенчский государственный университет, Ургенч, Узбекистан, atabek.atamuratov@yahoo.com.

УДК 53.072.8

Д. Р. СЕРГЕЙЧИК

## ЛАБОРАТОРНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО МАНИПУЛЯТОРА

Описана схема установки на основе микроконтроллера Arduino для симуляции работы промышленного робототехнического манипулятора. Разработана лабораторная установка на основе микроконтроллера Arduino и программное обеспечение для симуляции работы промышленного робототехнического манипулятора.

В современном мире роботы и робототехнические системы всё чаще применяются в промышленности и промышленном производстве, и наиболее распространёнными являются робототехнические манипуляторы. Наиболее распространены модули с шестью степенями свободы, имеющие универсальные крепежи для установки различных рабочих инструментов: захватных клешней, сварочных аппаратов, покрасочных пульверизаторов и так далее.

Задача разработки роботизированной руки состоит в том, чтобы в результате она имела возможность выполнять манипуляции, близкие к действиям человеческой руки, такие как захват объектов и их перенос, в условиях, когда использование человека нецелесообразно или невозможно. Таким образом, роботизированная рука может быть сконструирована для выполнения требуемых действий, процесс выполнения которых может контролировать человек [1].

Большинство промышленных роботов созданы для того, чтобы дополнить человека на предприятиях. Они помогают людям в тех секторах работы, которые выполнять человеку в одиночку было бы трудно или небезопасно. В самом простом виде промышленный робот – это машина, которую можно запрограммировать на выполнение различных работ, которые обычно включают перемещение объектов или манипуляции с ними. Промышленные роботы могут варьироваться от простых машин до очень сложных устройств с компьютерным управлением. Как уже говорилось ранее, наиболее распространённой формой промышленной робототехники являются роботизированные руки. В данном случае будет рассматриваться модель этого робота с высокой степенью гибкости вращения в пространстве. Речь идёт о роботе с шарнирными суставами [2].

С ростом технического прогресса растёт и степень автоматизации различных областей промышленности и, исходя из этого, растёт потребность в квалифицированных специалистах, в чьей компетенции будет техническое обслуживание этих робототехнических систем, а также программирование алгоритмов их работы. Но подготовка специалистов именно по программной части этих систем является большой проблемой, так как стоимость даже учебных макетов, имитирующих профессиональное робототехническое оборудование, очень высока. Из этого вытекает то, что не каждое учебное заведение, даже ориентированное на подготовку профильных инженеров, сможет подготовить специалиста, способного программировать алгоритмы работы промышленных роботов. Однако эту проблему можно нивелировать, создав более простой макет-симулятор, призванный демонстрировать выполнение написанных алгоритмов. Большинство компаний, производящих промышленных роботов, предоставляют учебные версии своего программного обеспечения для самостоятельного использования и обучения, а стоимость полных лицензий у других компаний, в любом

случае, будет гораздо ниже, чем покупка полноразмерного учебного макета с этим же программным обеспечением в комплекте. Совместив профессиональное программное обеспечение с собранным нами лабораторным стендом на основе микроконтроллера Arduino, можно добиться физической демонстрации работы алгоритма робота при помощи промежуточной программы-переводчика.

Созданная установка, в комплекте с программным обеспечением, позволяет создать алгоритм некоторой операции, выполняемой робототехническим манипулятором, а также протестировать его в профессиональном программном обеспечении ABBRobotStudio.

Механическая часть лабораторного модуля представляет собой модель робототехнического манипулятора из алюминия, изменяющая своё положение при помощи шести серводвигателей. Все серводвигатели подключены к микроконтроллеру ArduinoUno, а питание всех серводвигателей производится напрямую через лабораторный блок питания. В качестве органа управления к микроконтроллеру подсоединён джойстик со встроенной кнопкой, а также подключён LCD-экран, предназначенный для визуализации меню управления. Вся данная система позволяет изменять положение манипулятора, путём переключения между ними вертикальным движением джойстика и изменения угла серводвигателей горизонтальными движениями джойстика. Визуализация параметров серводвигателей происходит также через LCD-экран.

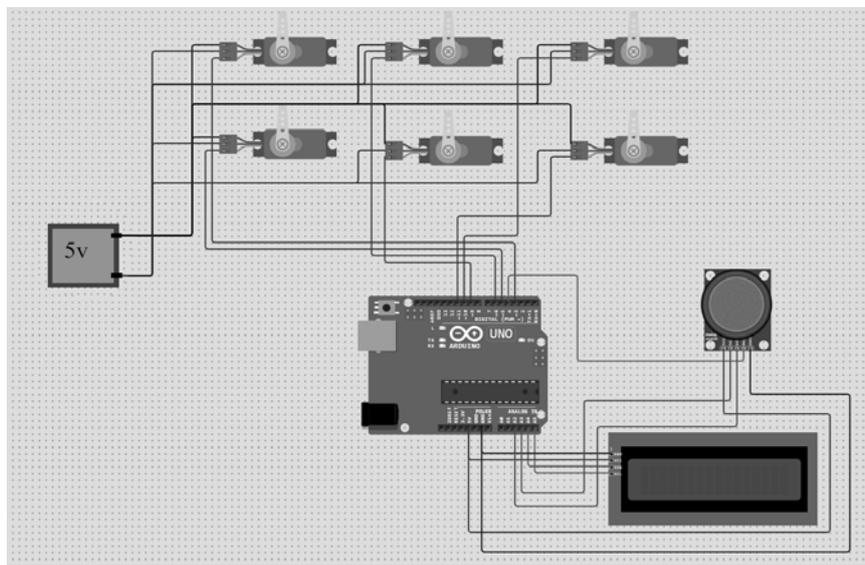


Рисунок 1 – Структурная схема механической части лабораторного модуля (питание микроконтроллера ArduinoUno происходит через USB порт ПК, питание серводвигателей – через лабораторный блок питания)

**Пример 1:** Демонстрация результатов работы манипулятора лабораторной установки.

Для демонстрации работы макета манипулятора был проведён опыт по переносу небольшого картонного кубика из позиции А в позицию Б. Контроль манипулятора производился при помощи джойстика. После каждого ключевого изменения позиции, данные об углах поворота каждого серводвигателя сохранялись путём нажатия на встроенную в джойстик кнопку.

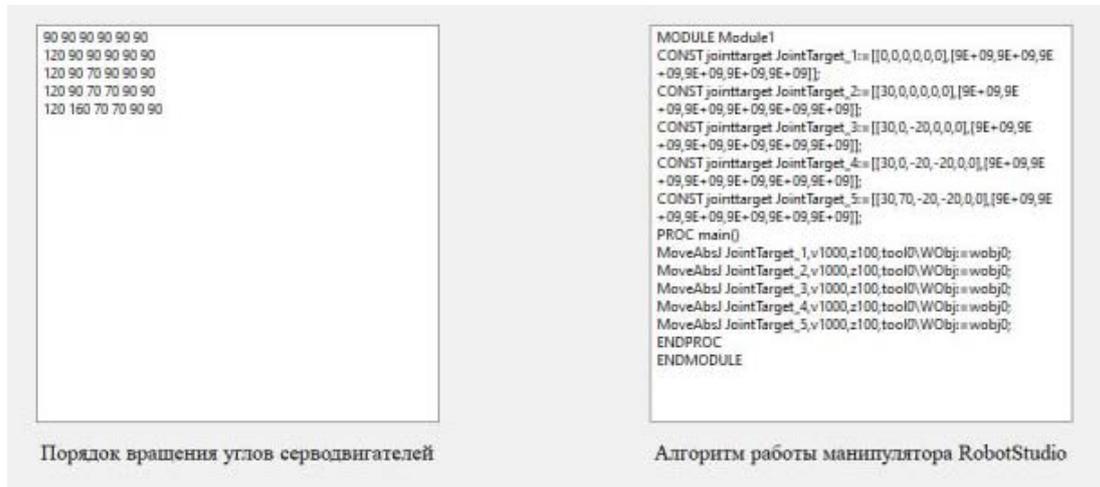
В результате опыта была получена последовательность изменения углов всех серводвигателей манипулятора, необходимых для совершения манипуляции «перенос объекта из начальной позиции в конечную». Данная последовательность углов выглядит следующим образом:

Таблица 1 – Расчётные значения последовательности изменения углов серводвигателей манипулятора

Шаг	Первый серводвигатель	Второй серводвигатель	Третий серводвигатель	Четвёртый серводвигатель	Пятый серводвигатель	Шестой серводвигатель
1	90	90	90	90	90	90
2	120	90	90	90	90	90
3	120	90	70	90	90	90
4	120	90	70	70	90	90
5	120	160	70	70	90	90

**Пример 2:** Демонстрация результатов работы программы лабораторной установки и тестирования полученного алгоритма в профессиональном ПО.

Специально созданная программа является промежуточным «переводчиком», предназначенным для преобразования полученного в прошлом примере алгоритма в понятный для профессионального ПО вид. В качестве профессионального ПО выступает ABBRobotStudio. Само преобразование в программе и итоговый результат отображаются в соответствующих окнах программы.



**Рисунок 2 – Преобразование алгоритма лабораторной установки в алгоритм программы ABBRobotStudio**

Для тестирования данного алгоритма в программе ABBRobotStudio была создана виртуальная симуляция промышленного манипулятора IRB 120 после чего во внутреннюю среду был добавлен преобразованный алгоритм из программы-переводчика.

**Пример 3:** Демонстрация обратного преобразования алгоритма внутренней среды ABBRobotStudio в формат, применимый для тестирования алгоритма на манипуляторе лабораторной установки.

Помимо тестирования самостоятельно созданных, при помощи модели манипулятора, алгоритмов на профессиональном ПО, также может возникнуть необходимость тестирования изначально созданного в ABBRobotStudio программного алгоритма на реальном манипуляторе. Для этого в созданной нами программе-переводчике также имеется функция обратного преобразования, позволяющая из программного алгоритма для модели манипулятора в ABBRobotStudio получить программный алгоритм, позволяющий выполнить аналогичную операцию на реальной модели манипулятора.



**Рисунок 3 – Обратное преобразование алгоритма программы ABB RobotStudio в алгоритм для лабораторной установки**

Таким образом, созданная лабораторная установка и приложенное программное обеспечение позволяет на базовом уровне освоить работу с профессиональным ПО для работы с промышленными роботами, а также тестировать созданные рабочие алгоритмы и переносить их между промышленной установкой и лабораторным макетом в любом пропорциональном масштабе.

#### *Список литературы*

1. Eastern Mediterranean University Institutional Repository [Electronic resource]: Design, Implementation and Control of a Robotic Arm Using PIC 16F877A Microcontroller / Arian Faravar / Eastern Mediterranean University, 2014. – Mode of access: <http://i-rep.emu.edu.tr:8080/jspui/bitstream/11129/1334/1/FaravarArian.pdf>. – Date of access: 24.03.2023.
2. PDFCOFFEE [Electronic resource]: Control of Robotic Arm Using Visual Basic and PIC Microcontroller / KhairulAnuar bin Juhari / UniversitiTeknikal Malaysia Melaka for the Degree of Bachelor of Engineering Manufacturing (Robotic and automation), 2007. – Mode of access: <https://pdfcoffee.com/control-of-robotic-arm-using-visual-basic-and-pic-microcontroller-tj211k42-2007-khairul-anuar-b-juhari-pdf-free.html>. – Date of access: 24.03.2023.

An installation scheme based on an Arduino microcontroller for simulating the operation of an industrial robotic manipulator is described. A laboratory installation based on an Arduino microcontroller and software for simulating the operation of an industrial robotic manipulator have been developed.

*Сергейчик Даниил Русланович*, студент 2-го курса магистратуры физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [daniils2000@yandex.by](mailto:daniils2000@yandex.by).

Научный руководитель – *Гачко Геннадий Алексеевич*, кандидат физико-математических наук доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [gachko@grsu.by](mailto:gachko@grsu.by).

УДК 621.38

В. А. СКРУНДЬ

### **ИЗМЕРИТЕЛЬ БИОИМПЕДАНСА НА ОСНОВЕ ИМС AD5933 ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ГЛЮКОЗЫ В КРОВИ**

Рассматривается применение измерителя биоимпеданса на основе AD5933 для контроля содержания глюкозы в крови. Биоимпеданс – важный параметр для оценки состояния тканей и органов человека, который может использоваться для определения объема жидкости в теле, состояния мышц и тканей, а также метаболических процессов.

Биоимпеданс является важным показателем для оценки состояния тканей и органов человека. Он характеризует сопротивление, которое ткани оказывают электрическому току, и может быть использован для определения таких параметров, как объем жидкости в теле, состояние мышц и тканей, а также метаболические процессы. Для измерения биоимпеданса часто используются специальные приборы, такие как импедансметры. С развитием микроэлектроники появились компактные и удобные в использовании устройства на базе специализированных интегральных микросхем (ИМС). Одной из таких ИМС является AD5933 (AnalogDevices, США) [1], которая предназначена для измерения импеданса в широком диапазоне частот.

AD5933 – это высокоточный преобразователь спектрального состава импеданса в широком диапазоне частот, в котором для каждой частоты вычисляются активная и реактивная составляющие импеданса, по которым затем вычисляются модуль импеданса и его фаза. ИМС объединяет в себе перестраиваемый по частоте генератор и 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с частотой дискретизации до 1 МГц. Генератор позволяет сформировать сигнал заданной частоты (до 100 кГц), на которой производится измерение импеданса. Измеряемые сигналы преобразовываются встроенным АЦП и обрабатываются алгоритмами на основе дискретного преобразования Фурье (DFT) с использованием интегрированного в ИМС цифрового сигнального процессора (DSP).

На основе AD5933 было сделано экспериментальное устройство для измерения биоимпеданса и дальнейшего определения, на его основе, уровня глюкозы в крови человека. Особенность данного метода измерения заключается в том, что он является неинвазивным, то есть не требует какого-либо повреждения кожного покрова для взятия образца крови, а работает путем приложения электродов к коже.

Для начала был проведен эксперимент для проверки возможности определять изменение концентрации глюкозы в водном растворе с помощью импеданса. После настройки и калибровки отладочной платы AD5933 были проведены несколько испытаний на растворах глюкозы с концентрацией 7.8 мМоль/л и 20 мМоль/л соответственно. Результаты представлены на рисунке.

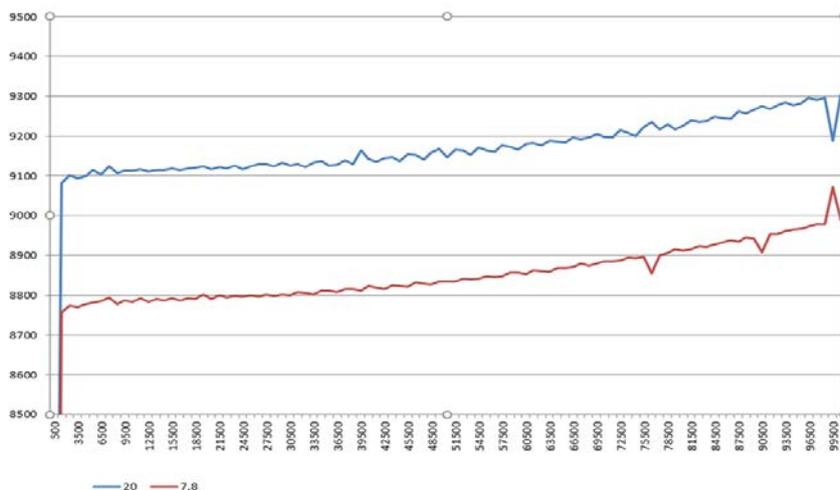


Рисунок 1 – Величина импеданса при различных уровнях глюкозы

В дальнейшем был проведен эксперимент с твердотельными электродами из хлорида серебра. Целью эксперимента было оценить, насколько хорошо прибор способен отслеживать изменения концентрации глюкозы в живых тканях человека. Electrodes were fixed on the inner side of the forearm. Such electrodes are usually used for registration of ECG signal, in particular for long-term ECG monitoring. These electrodes have good adhesion to the skin and low electrical resistance.

Эксперимент продолжался около восьми часов, в течение которых показания импеданса снимались каждый час. В это время испытуемый не употреблял пищу и воду, чтобы не влиять на уровень глюкозы в крови. Показания, полученные в результате эксперимента, изображены на рисунке:

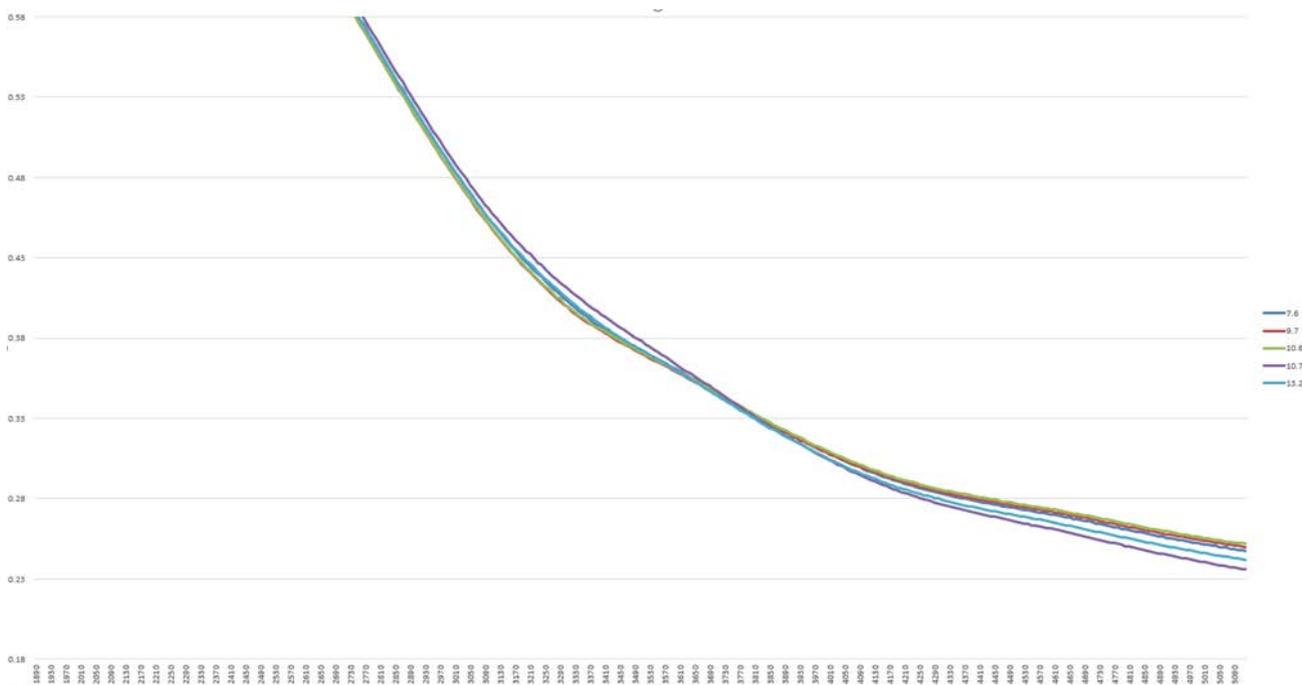


Рисунок 2 – Нормированный график биологического импеданса живой ткани человека при различных уровнях глюкозы в крови. Диапазон – от 1900 до 5000 Гц

Также был проведен эксперимент с электродом, разработанным специально для подобных целей. Разработка электрода подробно описана в данной статье [2]. Данная работа была взята за основу, при разработке электрода, так как авторам удалось добиться впечатляющих результатов при измерении импеданса с помощью разработанного ими электрода.

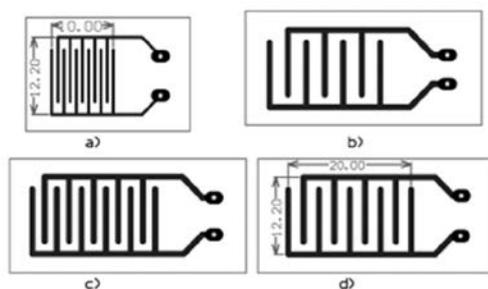


Рисунок 3 – Эскизы электродов, предназначенных для измерения уровня глюкозы в крови с помощью биологического импеданса

Электрод прикладывался к тыльной стороне ладони в том месте, где вена проходит близко к поверхности кожи.

Эксперимент продолжался в течение пяти часов, показания снимались каждый час. Данные, которые удалось собрать в результате эксперимента, изображены на рисунке.

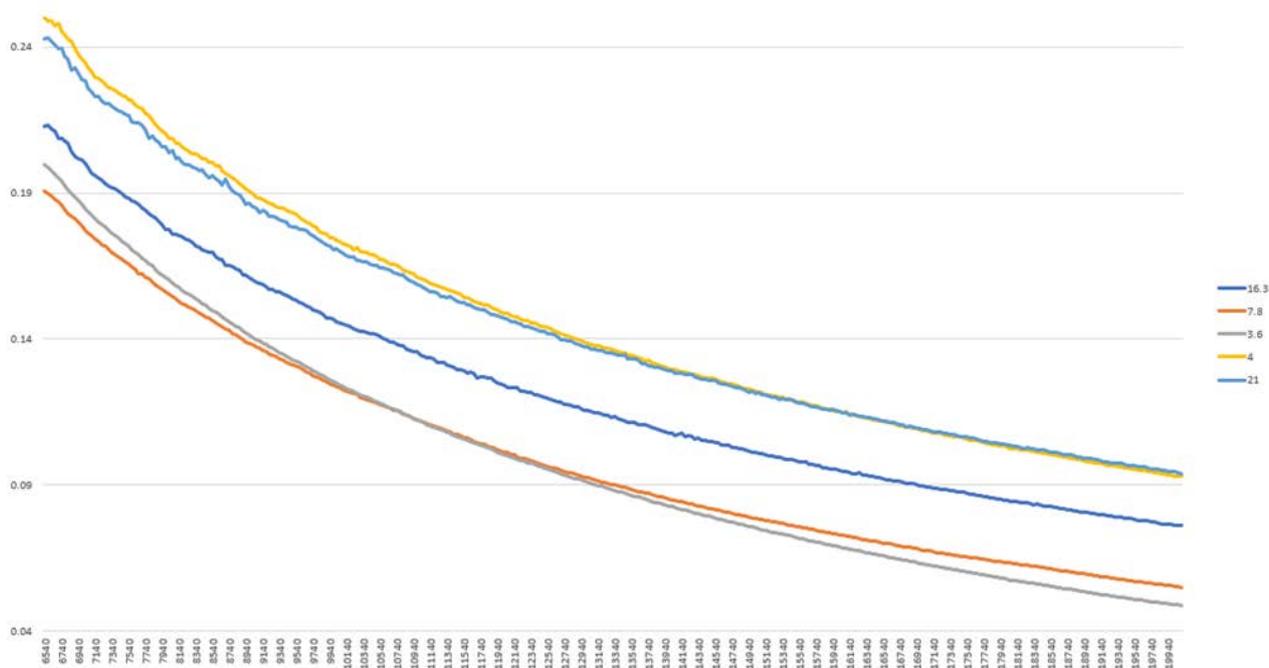


Рисунок 4 – Нормированный график биологического импеданса живой ткани испытуемого при различных уровнях глюкозы в крови. Диапазон частот – от 6500 до 20000 Гц

#### Список литературы

1. Pockevicius, V. Blood Glucose Level Estimation Using Interdigital Electrodes / V. Pockevicius, V. Markevicius [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/6f4b/9454cc98624629141ced978e9fcb1ba78cd6.pdf>. – Дата доступа: 03.03.2024.

2. Техническая документация [Электронный ресурс] // Аналог. – 2020. – Режим доступа: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad5933.pdf>. – Дата доступа: 03.03.2024.

This article discusses The application of a bioimpedance meter based on AD5933 for controlling the glucose level in blood is considered. Bioimpedance is an important parameter for assessing the state of tissues and organs of a human, which can be used for determining the volume of fluid in the body, the state of muscles and tissues, as well as metabolic processes.

*Скрундь Владислав Александрович*, студент 1-го курса магистратуры физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [vladskrund20@gmail.com](mailto:vladskrund20@gmail.com).

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [german@grsu.by](mailto:german@grsu.by).

О. И. ТИХОН, Н. В. ТАЛИШ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН СВЧ ЭНЕРГИЕЙ НА ПРОЦЕСС СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА С ИХ ПОВЕРХНОСТИ

Исследована возможность интенсификации процесса СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности группы кремниевых пластин за счёт их предварительного разогрева СВЧ энергией, инициализирующей процесс плазмобразования. Показано, что скорость удаления фоторезиста при давлении 100 Па в рабочей камере СВЧ плазменной установки резонаторного типа увеличивается практически линейно с повышением длительности предварительного нагрева кремниевых пластин за счёт временной задержки возбуждения СВЧ плазменного разряда после начала генерации СВЧ энергии. Экспериментально установлено, что увеличение времени нагрева кремниевых пластин с 4 до 16 секунд позволяет повысить скорость протекания процесса СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста с их поверхности на ~35 %.

При реализации этапов технологического процесса плазмохимической обработки полупроводниковых материалов скорость их выполнения, а также свойства и качество полученной поверхности, определяются как непосредственно используемым способом воздействия активных частиц на обрабатываемый объект, так и условиями, интенсифицирующими их взаимодействие.

Плазменная СВЧ обработка фоторезистивного материала в значительной степени зависит от параметров техпроцесса, определяющих степень деструктивного воздействия на компонентный состав полимерной плёнки: концентрации и природы плазменных частиц, распределения и характера электромагнитных полей, температуры обрабатываемых подложек и др. [1]. Известно, что особенности взаимодействия СВЧ энергии с подложками монокристаллического кремния, позволяют добиться быстрого разогрева объёма материала за довольно короткий промежуток времени [2]. Это означает, что для случая удаления фоторезистивной плёнки с поверхности Si пластины непосредственно в объёме СВЧ плазмы возможен простой способ реализации механизма предварительного нагрева фоторезиста, что может позволить сократить время, необходимое для завершения процесса обработки.

В ходе проведения экспериментального исследования выполнялась оценка влияния длительности предварительного нагрева кремниевых пластин СВЧ энергией на скорость удаления фоторезиста с их поверхности. Обработка выполнялась в реакционно-разрядной камере СВЧ установки резонаторного типа [3]. На обрабатываемые пластины диаметром 100 мм в стандартных условиях был нанесён слой фоторезиста марки *S1813G2SP15* толщиной 1,2 мкм. Одновременно выполнялась обработка двух пластин, расположенных горизонтально в объёме камеры. Мощность СВЧ магнетрона в составе СВЧ генераторной системы – 1030 Вт, форма сигнала – импульсная. В качестве плазмообразующего газа был использован  $O_2$ .

Скорость полного удаления фоторезистивного материала определялась по интенсивности спектральных линий атомарного кислорода, регистрируемых в процессе обработки в объёме рабочей камеры СВЧ плазменной установки. СВЧ плазменная обработка материалов проводилась до полного удаления плёнки фоторезиста. Моменту формирования СВЧ разряда предшествовал предварительный нагрев кремния, осуществляемый электромагнитной энергией от СВЧ генератора, вводимой по волноводному тракту в объём резонаторной камеры. Время предварительного нагрева составило 4, 8, 12 и 16 секунд. Возбуждение плазмы СВЧ разряда после разогрева Si пластин выполнялось за счёт напуска в предварительно откачанный до ~10 Па реакционный объём рабочего газа и установки давления на уровне 200 Па. Полученные экспериментальные результаты представлены на рисунке 1.

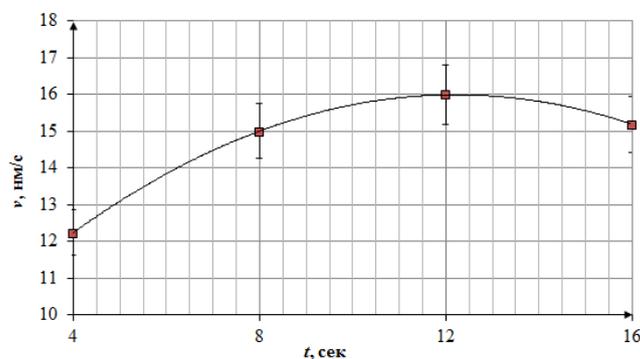
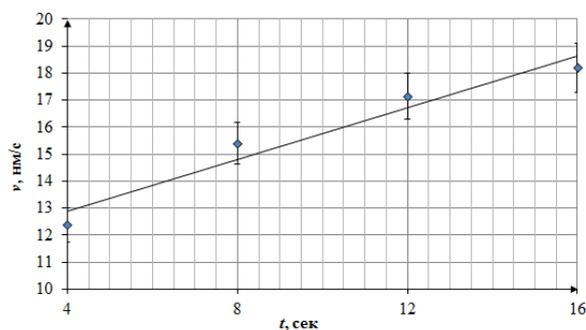


Рисунок 1 – Зависимость скорости удаления фоторезиста с поверхности двух кремниевых пластин Ø100 мм от времени их предварительного нагрева СВЧ энергией при давлении 200 Па

Установлено, что в случае групповой обработки пластин с фоторезистом предварительный нагрев материала при задержке возбуждения СВЧ разряда (времени нагрева СВЧ энергией) наблюдается рост скорости полного снятия плёнки фоторезиста с поверхности кремниевых подложек. Увеличение времени нагрева с 4 до 12 секунд показало рост скорости процесса удаления фоторезиста на ~20 %. Дальнейшее повышение времени воздействия СВЧ энергии на пластину на 4 секунды продемонстрировало незначительное уменьшение скорости удаления материала.

С целью оценки влияния рабочего давления в камере на процесс обработки серия экспериментов была также проведена при давлении 100 Па. Полученные экспериментальные результаты представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Зависимость скорости удаления фоторезиста с поверхности двух кремниевых пластин Ø100 мм от времени их предварительного нагрева СВЧ энергией при давлении 100 Па**

По результатам проведённых экспериментов установлено, что снижение рабочего давления до 100 Па позволило получить близкую к линейной зависимость роста скорости удаления фоторезиста от времени предварительного нагрева на всём исследуемом диапазоне значений. При этом увеличение времени нагрева с 4 до 16 секунд повысило скорость протекания процесса на ~35 %. Данный результат, говорит о том, что процесс плазмохимической обработки фоторезистивной плёнки при давлении 100 Па является предпочтительным. Это может быть связано с оптимальной концентрацией активных частиц в реакционном объёме, способствующей повышению интенсивности их воздействия на предварительно разогретую поверхность образца.

Таким образом, показана возможность использования реализованного способа предварительного нагрева кремниевых пластин с фоторезистивным материалом за счёт задержки возбуждения СВЧ разряда. Нагрев материала СВЧ энергией перед моментом формирования плазмы СВЧ разряда в этом же реакционном объёме может позволить интенсифицировать процесс удаления фоторезиста. Это делает перспективным использование подобного метода при оптимизации технологических процессов СВЧ плазмохимической обработки полупроводниковых материалов.

#### Список литературы

1. Microwave heating and its applications in surface engineering: a review / Н. Vasudev [et al.] // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 6, № 10.
2. Thermal processing of silicon wafers with microwave co-heating / Н. Zohm [et al.] // Microelectronic Engineering. – 2000. – Vol. 54, iss. 3–4. – P. 247–253.
3. Тихон, О. И. Исследование процесса СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин при различных режимах электропитания СВЧ магнетрона / О. И. Тихон, И. А. Иванов // Физика конденсированного состояния [Электронный ресурс] : материалы XXXI междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 13–14 апр. 2023 г. / ГрГУ им. Янки Купалы ; ред.: Г.А. Гачко, О.А. Жарнова [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2023. – С. 345–347.

The possibility of intensification of microwave plasma-chemical photoresist removal from the surface of a group of silicon wafers due to their preheating has been investigated. A method was implemented to increase the temperature of the wafers in the evacuated working volume of the plasma unit due to the exposure of the treatment object to microwave energy, which initiates the plasma formation process. It has been shown that plasma treatment of heated wafers demonstrates a natural increase in the photoresist material removal rate. The photoresist stripping rate at optimum pressure in the working chamber of the resonator-type microwave plasma unit rises almost linearly with increasing preheating duration due to the time delay before the excitation of the microwave plasma discharge.

*Тихон Олег Игоревич*, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kritgar@bsuir.by.

*Талиш Николай Викторович*, студент 4-го курса факультета компьютерного проектирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь.

Научный руководитель – *Мадвейко Сергей Игоревич*, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электронной техники и технологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, madveyko@bsuir.by.

УДК 621.314.214

А. С. УРБАНОВИЧ

## УЧЕБНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В современном мире технология передачи электроэнергии на расстоянии применяется всё чаще и студентам не хватает как теоретических, так и практических знаний в данной области. В статье описывается устройство стенда для изучения на практике беспроводной передачи электроэнергии.

Стенд предназначен для наглядной демонстрации работы воздушного трансформатора при условиях:

- Передача электроэнергии в зависимости от расстояния.
- Передача электроэнергии на фиксированном расстоянии через различные материалы (металл, пластик, стеклотекстолит и др.).
- Изучение передачи в зависимости от формы сигнала и частоты.

Этот проект преследует цель дать студентам возможность закрепить теоретические знания на практике посредством лабораторной работы. В первом опыте можно будет наблюдать изменение передаваемой энергии, проходящей по закону обратных квадратов. Второй же опыт позволит наблюдать как изменяется передаваемая энергия сквозь различные материалы и выявить что магнитные поля почти беспрепятственно проходят через диэлектрики, но почти не проходят сквозь металлы из-за возникновения токов Фуко.

**Устройство стенда.** Стенд состоит из подвижной и неподвижных частей. Основная, неподвижная часть состоит из первичной обмотки, потенциометра, источника низкочастотных сигналов. В подвижную часть устанавливается вторичная обмотка, а в качестве нагрузки и измерительного оборудования выступает осциллограф. Благодаря тому, что вторичная обмотка будет подвижной, можно будет наблюдать, как зависит количество получаемой энергии от расстояния и частоты получаемой от генератора.

Разберём составляющие более подробно. Первичная обмотка состоит из 10 витков провода с сечением 1,4 мм, с диаметром катушки 45мм. В качестве источника питания предполагается использовать генератор низкочастотных сигналов, например ГЗ-112/1, так как нет необходимости в большом напряжении из соображений безопасности, и есть возможность регулирования частоты и формы сигналов. Вторичная обмотка состоит из 45 витков провода с сечением 0,4 мм, диаметр катушки 85 мм.

При таких характеристиках максимально рабочее расстояние составляет около 140 мм при синусоидальной форме сигнала и 170 мм при меандре. Особенностью передачи прямоугольного сигнала, помимо увеличенного рабочего диапазона, является затухающие синусоидальные колебания на вторичной катушке имитирующие переходный процесс в электросети, что можно будет использовать в других лабораторных работах.

Дополнительно стоит указать рабочие частоты стенда так как имеется два диапазона:

1. 20–30 кГц – ниже данных частот имеются слишком сильные помехи, а выше данных частот сигнал пропадает вовсе.
2. 30–100 МГц – с 70 кГц и до 30 МГц в сигнале присутствуют помехи мешающие чистоте эксперимента, выше 30 помехи пропадают.

Так же стоит упомянуть что благодаря простоте, безопасности и относительной дешевизне конструкции данный стенд можно использовать для объяснения и демонстрации эффекта беспроводной передачи электроэнергии учащимся в заведениях различных ступеней образования, таких как университеты, колледжи и средние школы. В качестве измерительного оборудования для данного стенда рекомендуется использовать осциллограф, в случае если его нет – можно использовать мультиметр в режимах измерения переменного тока и переменного напряжения.

### Список литературы

1. Жеребцов, И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов. – М., 1989.
2. Галкин, В. И. Начинаящему радиолюбителю / В. И. Галкин. – М., 1989.

In the modern world, the technology of electricity transmission at a distance is being used more and more often and students lack both theoretical and practical knowledge in this field. The article describes the device of the stand for studying in practice the wireless transmission of electricity.

*Урбанович Алексей Сергеевич*, студент 3-го курса физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, trop432101234@gmail.com.

Научный руководитель – *Васильев Сергей Валерьевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, s.vasilijev@grsu.by.

В. А. ХОХЛЁНОК

## УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С УДАЛЁННЫМ СБОРОМ ДАННЫХ С BLUETOOTH ИНТЕРФЕЙСОМ

Разработано устройство контроля потребления электрической энергии с удаленным сбором данных с Bluetooth интерфейсом. Это устройство, интегрированное с мобильным приложением, предоставляет пользователям детальную информацию об их энергопотреблении в денежном эквиваленте, а также позволяет отображать графики потребления за различные временные интервалы: от одного часа до месяца. В качестве ключевого компонента этой разработки использовался датчик Холла.

В настоящем времени все дома оснащены электросчетчиками, которые измеряют потребление электроэнергии с высоким уровнем точности до 2,5 %. Однако возникают ситуации, когда электросчетчик неисправен или неправильно подключен. Вследствие чего происходит нарушение расчетов оплаты за потребление электроэнергии. Для решения данной проблемы предлагается использовать дополнительное устройство, способное проводить независимую проверку измерений, выполненных электросчетчиком.

Был проведён анализ датчиков тока по следующим критериям: возможность измерения тока без вмешательства в электрическую цепь; стоимость; точность измерений; возможность измерения переменного тока; измерение силы тока 40 А и выше.

Для сравнительного анализа были выбраны следующие датчики: резистивные датчики, датчик Холла, трансформатор тока и пояс Роговского. По результатам анализа был сделан выбор в пользу датчика Холла. Обосновано это несколькими преимуществами: существует возможность бесконтактного измерения тока, средняя стоимость (выше, чем у резистивных, но ниже чем у трансформатора тока), погрешность (< 10 %), возможность измерять токи и выше 40 А.

Токовый датчик на основе датчика Холла содержит кольцо из феррита или кремнистой стали. Ток, проходящий через проводник, генерирует магнитное поле. Магнитное кольцо концентрирует магнитный поток в области микросхемы датчика Холла [3].

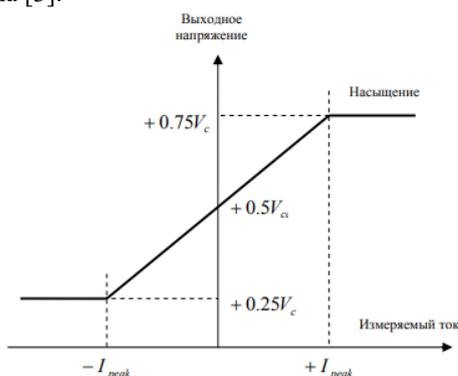


Рисунок 1 – Зависимость измеряемого тока от выходного напряжения

Выход интегральной схемы датчика Холла пропорционален току в проводнике, выходной линейный сигнал точно воспроизводит форму измеряемого тока.

Линейный токовый датчик определяет не сам ток, а величину магнитного поля, создаваемого протекающим током. Измеряемый ток проходит кольцо, концентрирующее магнитный поток в области датчика Холла. Форма напряжения на выходе датчика Холла соответствует форме измеряемого тока.

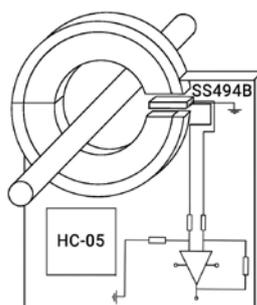


Рисунок 2 – Схематическая конструкция датчика тока

Датчик тока состоит из ферритового кольца, распиленного на две равные части, находящиеся в защитной оболочке. В одном из соединений этих частей находится углубление около 2 мм для размещения датчика Холла SS494B. Датчик прикреплен к схеме, которая на рисунке 2 изображена схематично.

Схема работает следующим образом. Провод закрепляется внутри ферритового кольца, создавая при этом магнитное поле, величина которого прямо пропорциональна силе тока. Датчик Холла преобразует величину индукции поля в напряжение, и это напряжение подается на операционные усилители. ОУ необходимы, чтобы привести уровни напряжения с датчика к диапазону входных напряжений АЦП. Полученные данные обрабатываются микроконтроллером и передаются через Bluetooth модуль в приложение на телефоне.

Для передачи информации полученной с датчика по Bluetooth в устройстве используется модуль HC-05.

```
<uses-permission android:name="android.permission.BLUETOOTH_ADMIN"/>
<uses-permission android:name="android.permission.BLUETOOTH"/>
```

Рисунок 3 – Разрешения в AndroidManifest.xml для работы с Bluetooth

```
no usages
public static final String SERVICE_ID = "00001101-0000-1000-8000-00805f9b34fb";
no usages
public static final String SERVICE_ADDRESS = "98:D3:31:FB:82:85";
```

Рисунок 4 – Константы для подключения с модулем HC-05

Для взаимодействия Android-приложения с модулем необходимо прописать строки разрешения на Bluetooth-подключения, а также определить константы, содержащие адрес модуля (рисунок 3,4). После необходимой настройки создаются Threads (потоки), обеспечивающие обмен данными с микроконтроллером, сохраняя при этом оптимальную производительность мобильного устройства.

Таким образом, созданное устройство представляет собой эффективное решение для контроля и мониторинга потребления электроэнергии, обеспечивая пользователям удобный способ управления и визуализации данных о потреблении энергии.

#### Список литературы

1. Datasheet SS494B [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/466/DOC012466404.Pdf>. – Дата доступа: 18.02.2024.
2. Datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/374/DOC011374324.pdf>. – Дата доступа: 13.02.2024.
3. Датчики на основе эффекта Холла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.smd-component.ru/pdf/hallsensors\\_review.pdf](https://www.smd-component.ru/pdf/hallsensors_review.pdf). – Дата доступа: 10.02.2024.
4. Современные промышленные датчики тока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://blog.avislab.com/uploads/2014/05/Current\\_sensors.pdf](https://blog.avislab.com/uploads/2014/05/Current_sensors.pdf). – Дата доступа: 10.02.2024.

A device for monitoring electrical energy consumption with remote data collection with a Bluetooth interface has been developed. This device, integrated with a mobile application, provides users with detailed information about their energy consumption in monetary terms, and also allows you to display consumption graphs for various time intervals: from one hour to a month. The main component of this development was a Hall effect sensor.

*Хохлёнок Вероника Александровна*, студент 4-го курса физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [webprint29@mail.ru](mailto:webprint29@mail.ru).

Научный руководитель – *Ступакевич Валерий Юзефович*, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [tv\\_sad@grsu.by](mailto:tv_sad@grsu.by).

М. В. ШКУТА  
**УСТРОЙСТВО ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВЕН  
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ  
В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Рассмотрены история, устройство, принцип работы визуализатора вен, а также результаты эксперимента по получению изображения с помощью камеры с инфракрасной подсветкой.

С самых ранних времен врачи использовали освещение и зрительную оценку для поиска вен. Однако этот метод был подвержен ошибкам и не всегда гарантировал точный выбор. С появлением электронных устройств и инфракрасных технологий началась эволюция визуализаторов вен.

Первые визуализаторы вен, основанные на инфракрасных технологиях, появились в конце 1990-х годов. Они используют инфракрасное излучение для определения местонахождения вен под кожей. Эти устройства позволяют видеть вены даже при сложных условиях освещения и помогают врачам выбирать правильную точку для внутривенного доступа.

Визуализатор вен – это инновационное медицинское устройство, которое представляет собой прибор, сканирующий венозную систему человека. С помощью инфракрасной камеры и специализированного программного обеспечения сканер вен считывает индивидуальный узор венозной сетки и передает его обратно на кожу. Устройства визуализации вен принадлежат к классу медицинского оборудования, предназначенного для наглядной демонстрации и поиска венозных структур у пациентов.

Главное достоинство визуализатора вен заключается в его способности точно определять место для прокола вены. Это оборудование помогает медицинскому персоналу проводить процедуры, такие как забор крови, внутривенные инъекции или постановка капельницы, с высокой точностью. Визуализаторы вен способствуют повышению успешности внутривенных вмешательств и снижению болевых ощущений у пациентов. Пример визуализатора вен представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Пример визуализатора вен

***Принцип работы визуализатора вен.***

Сканер вен использует безвредный ближний инфракрасный свет, который направлен на кожу пациента. Гемоглобин в крови поглощает инфракрасное излучение, а окружающая ткань отражает его. Сканер обрабатывает полученную информацию, визуализирует её, добавляет цвет и проецирует на кожу. Можно увидеть расположение кровеносных сосудов в реальном времени и рисунки вен, находящихся под кожей на глубине до 10 мм. И всё это без гелей и других материалов.

Для разработки визуализатора вен, нужно решить несколько задач:

1. Выбрать подходящую ир-камеру, которая поддерживает протокол RTSP и имеет достаточное разрешение и частоту кадров для передачи видеопотока с венами. Для проекта предварительно выбрана камера видеонаблюдения EzvizH3C, ее характеристики соответствуют поставленной задаче.
2. Провести предварительный эксперимент с камерой, чтобы проверить ее работоспособность, качество изображения, точность визуализации, и удобство использования. Камера имеет встроенную ИК-подсветку и ИК-фильтр, это означает, что получить предварительные результаты можно без разработки программного кода для обработки видеопотока. Результат использования камеры представлен на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Результат использования камеры**

3. Разработать программное обеспечение, которое может получать и обрабатывать видеопоток с ip-камеры, выделять вены из фона и визуализировать их на экране или проекторе. Программное обеспечение будет написано на языке программирования Python. Язык Python имеет много преимуществ в области обработки изображений. Некоторые из них: поддержка множества библиотек, которые предоставляют различные функции и алгоритмы для работы с изображениями, обладает высокой читаемостью и простотой синтаксиса, позволяет легко интегрировать свой код с другими языками и платформами. Для примерного представления результата работы программного кода, полученное изображение с камеры будет обработано вручную. На рисунке 3 показано ручная обработка изображения, без использования программного кода.



**Рисунок 3 – Результат ручной обработки изображения**

Таким образом, была продемонстрирована принципиальная возможность применения популярных камер видеонаблюдения для решения задачи создания визуализатора вен.

#### *Список литературы*

1. Магеррамов, Р. В. Аппаратная система для визуализации текстур вен [Электронный ресурс] / Р. В. Магеррамов // Молодой ученый. – 2017. – № 31 (165). – С. 11–14. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/165/45327>. – Дата доступа: 28.02.2024.
2. Wu Q., Kang W. Contactless palm vein recognition using a mutual foreground-based local binary pattern. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2014, vol. 9, no. 11, pp. 1974–1985. – DOI: 10.1109/TIFS.2014.2361020
3. Hernández-García R., Barrientos R. J., Rojas C. Individuals identification based on palm vein matching under a parallel environment. Applied Sciences, 2019, vol. 9, no. 14, p. 2805. – DOI: 10.3390/app9142805.0

The history, design, operating principle of the vein visualizer, as well as the results of an experiment on obtaining images using a camera with infrared illumination are considered.

*Шкута Максим Валерьевич*, студент 4-го курса физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [maksim.shkuta.ma@gmail.com](mailto:maksim.shkuta.ma@gmail.com).

Научный руководитель – *Герман Андрей Евгеньевич*, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электроники физико-технического факультета, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Республика Беларусь, [german@grsu.by](mailto:german@grsu.by).