

УДК 629.734/.73.5.03

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO В ИССЛЕДОВАНИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА.

студент гр.10309114 Булавко В.М., гр. 10909112 Калютчик И.Э.

*Научный руководитель – Чигарев В.А.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

На сегодняшний день Arduino является, пожалуй, самой популярной аппаратной платформой для обучения, прототипирования и создания разного рода проектов начального уровня. Благодаря своей простоте и дешевизне, эта платформа быстро завоевала сотни тысяч поклонников по всему миру. Именно Arduino дала старт стремительному проникновению идеи микроконтроллерного управления в массы.

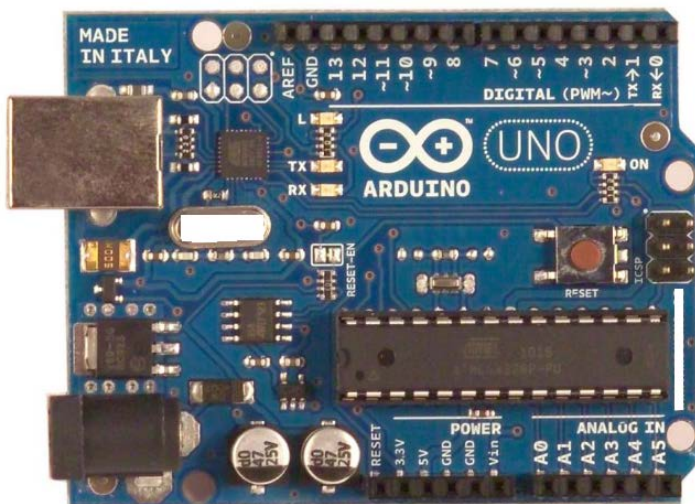


Рисунок 1 – плата Arduino

Микроконтроллер — микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Классический микроконтроллер сочетает в себе функции процессора и

периферийных устройств, может содержать ОЗУ и ПЗУ, по сути, являясь однокристальным компьютером, способным выполнять простые задачи. Использование одной микросхемы, вместо целого набора, как в случае обычных процессоров, применяемых в персональных компьютерах, значительно снижает размеры, энергопотребление и стоимость устройств, построенных на базе микроконтроллеров. На сегодняшний день наибольшую популярность приобрели микроконтроллеры на базе Arduino.

Arduino — аппаратная вычислительная платформа, состоящая из двух основных компонентов: платы ввода-вывода и среды разработки. Эта платформа используется во всем мире из-за простого языка программирования, открытой архитектуры и программного кода. Благодаря такому подходу в разработке, а также их общедоступности появилось множество форм-факторов плат.

### **Аппаратная часть платформы Arduino**

Существует несколько версий платформ Arduino. Последняя версия Leonardo базируется на микроконтроллере ATmega32u4. Uno, как и предыдущая версия Duemilanove построены на микроконтроллере Atmel ATmega328. Старые версии платформы Diecimila и первая рабочая Duemilanoves были разработаны на основе Atmel ATmega168, более ранние версии использовали ATmega8. Arduino Mega2560, в свою очередь, построена на микроконтроллере ATmega2560.

Основные версии плат Arduino:

- Due — новая плата на базе ARM микропроцессора 32bit Cortex-M3 ARM SAM3U4E.
- Leonardo — последняя версия платформы Arduino на ATmega32u4 микроконтроллере. Отличается разъемом microUSB, по размерам совпадает с UNO.
- Yun (описание на англ.) - новая плата, с встроенной поддержкой WiFi на базе ATmega32u4 and the Atheros AR9331
- Micro — новое компактное решение на базе ATmega32u4.
- Uno — самая популярная версия базовой платформы Arduino USB. Uno имеет стандартный порт USB. Arduino Uno во многом схожа с Duemilanove, но имеет новый чип ATmega8U2 для

последовательного подключения по USB и новую, более удобную маркировку вход/выходов. Платформа может быть дополнена платами расширения, например, пользовательскими платами с различными функциями.

- Arduino Ethernet — контроллер со встроенной поддержкой работы по сети и с опциональной возможностью питания по сети с помощью модуля POE (Power over Ethernet).

- Duemilanove — является предпоследней версией базовой платформы Arduino USB. Подключение Duemilanove производится стандартным кабелем USB. После подключения она готова к использованию. Платформа может быть дополнена платами расширения, например, пользовательскими платами с различными функциями.

- Diecimila — предыдущая версия базовой платформы Arduino USB.

- Nano — это компактная платформа, используемая как макет. Nano подключается к компьютеру при помощи кабеля USB Mini-B.

- Mega ADK - версия платы Mega 2560 с поддержкой USB host интерфейса для связи с телефонами на Android и другими устройствами с USB интерфейсом.

- Mega2560 – новая версия платы серии Mega. Построена на базе Atmega2560 и с использованием чипа ATmega8U2 для последовательного соединения по USB порту.

- Mega – предыдущая версия серии Mega на базе Atmega1280.

- Arduino BT платформа с модулем Bluetooth для беспроводной связи и программирования. Совместима с платами расширения Arduino.

- LilyPad– платформа, пурпурного цвета, разработанная для переноски, может зашиваться в ткань.

- Fio – платформа разработана для беспроводных применений. Fio содержит разъем для радио XBee, разъем для батареи LiPo и встроенную схему подзарядки.

- Mini – самая маленькая платформа Arduino. Прекрасно работает как макетная модель, или, в проектах, где пространство является критическим параметром. Платформа подключается к компьютеру при помощи адаптера Mini USB.

- Адаптер Mini USB – плата, конвертирующая подключение USB в линии 5 В, GND, TX и RX для соединения с платформой Arduino Mini или другими микроконтроллерами.
- Pro – платформа, разработанная для опытных пользователей, может являться частью большего проекта. Она дешевле, чем Diecimila и может питаться от аккумуляторной батареи, но в тоже время требует дополнительной сборки и компонентов.
- Pro Mini – как и платформа Pro разработана для опытных пользователей, которым требуется низкая цена, меньшие размеры и дополнительная функциональность.
- Serial – базовая платформа с интерфейсом RS232 для связи и программирования. Плата легко собирается даже начинающими пользователями. (включает схемы и файлы CAD)
- Serial Single Sided – платформа разработана для ручной сборки. Она обладает чуть большим размером, чем Diecimila, но совместима с платами расширения Arduino.
- USB Serial Light Адаптер - адаптер, позволяющий подключать платы Arduino к компьютеру для обмена данными и заливки скетчей. Удобен для программирования таких плат, как Arduino Mini, Arduino Ethernet и других, не имеющих своего разъема USB.

Из-за популярности и открытости платформы для плат Arduino сегодня выпускается множество различных модулей: датчики света, звука, вибрации, дыма и т.д. Благодаря такому разнообразию стало возможно проводить различные исследования, не прибегая к приобретению дорогостоящего оборудования. Для того что бы начать работать с Arduino понадобятся следующие компоненты:

- 1) Плата Arduino
- 2) USB-кабель
- 3) Среда разработки для Arduino – Arduino IDE.
- 4) Модули для конкретной задачи.

Проведем при помощи Arduino исследования влияние частоты сигнала на пьезоизлучатель звука — пьезодинамик. Пьезокерамический излучатель состоит из металлической пластины, на которую нанесена пьезоэлектрическая керамика, имеющая токопроводящее напыление. Пластина и напыление

являются контактами пьезоизлучателя, при этом устройство имеет полярность — плюс и минус. (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Устройство пьезоизлучателя и динамика

В пьезокристаллах под действием механических сил на сдвиг, изгиб или кручение образуются электрические заряды. Более детальные исследования пьезоэффекта показали, что он объясняется свойством элементарной ячейки структуры материала. При этом элементарная ячейка является наименьшей симметричной единицей материала, из которой путем ее многократного повторения можно получить микроскопический кристалл. Было доказано, что необходимой предпосылкой для появления пьезоэффекта является отсутствие центра симметрии в элементарной ячейке (Рисунок 3).

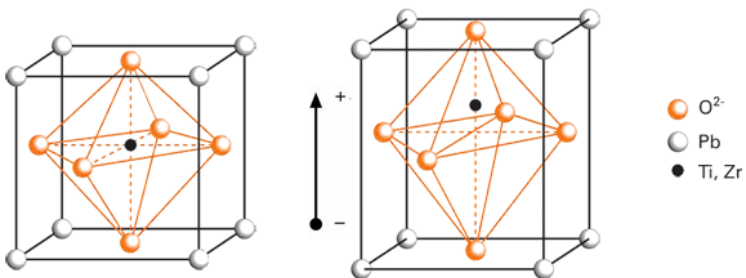
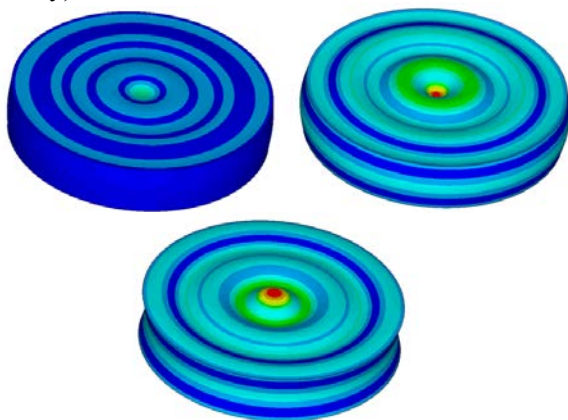


Рисунок 3 – Элементарная ячейка цирконата титоната свинца.

Кроме «прямого» эффекта существует и обратный эффект — если подать электричество на кристалл, то он начнет деформироваться (Рисунок 4). Эти колебания и создают звук (звуковую волну).



Диаметр – 10мм, толщина 1мм, материал цтс,  
напряжение 5В, частота 1МГц.

Рисунок 4 - Колебание свободного пьезоэлемента в форме диска под действием напряжения.

В данной модели частоту звука можно будет регулировать, задавая соответствующие параметры в коде программы. Пьезоизлучатели получили широкое распространение: их используют в различных электронных устройствах — будильниках, телефонах, игрушках и в другой бытовой технике. Использование пьезоизлучателей звука для различных оповещений при работе оборудования оправдано ввиду их низкой стоимости и малого потребления энергии. По сравнению с традиционными электромагнитными преобразователями звука, пьезоизлучатели имеют простую конструкцию, а поэтому и низкую стоимость.

Для подключения пьезоизлучателя к Arduino будет использована макетная плата для облегчения отладки и простоты соединения. На экран LCD1602 выводится частота сигнала, подаваемая на пьезоизлучатель. Схема подключения всех компонентов представлена на Рисунке 5:

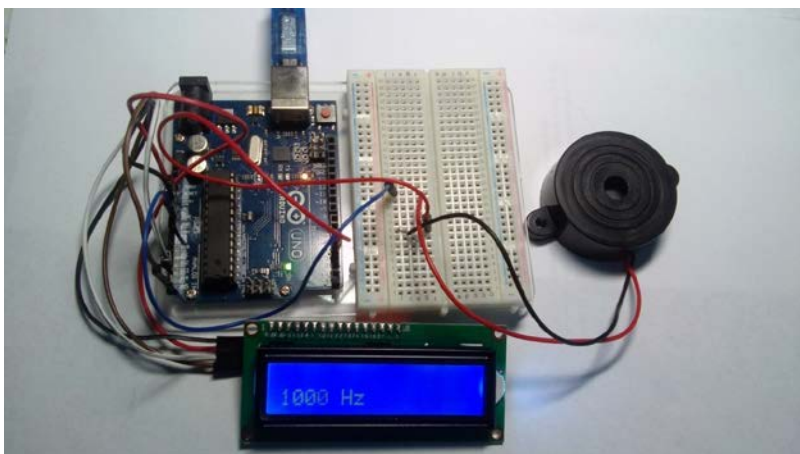


Рисунок 5 – Подключение пьезоизлучателя и LCD экрана к Arduino.

После сборки схемы и подключения компонентов с вывода Arduino на пьезодинамик подается сигнал. Воспроизведение звука на Arduino выполняется функцией *tone()*, где в качестве аргументов она принимает номер вывода Arduino и звуковую частоту. Нижний предел частоты – 31 Гц, верхний предел ограничен параметрами пьезоизлучателя и человеческого слуха. Функция *tone()* генерирует на порту вход/выхода сигнал — прямоугольную "волну" (с коэффициентом заполнения 50% - меандр), заданной частоты. Длительность задается параметром, в противном случае сигнал генерируется пока не будет вызвана функция *noTone()*.

Меандры широко используются в электронных схемах для тактирования и сигналов синхронизации, так как они имеют симметричную прямоугольную форму волны с равной продолжительностью полупериодов (Рисунок 6). Практически все цифровые логические схемы используют сигналы в виде меандра на своих входах и выходах.

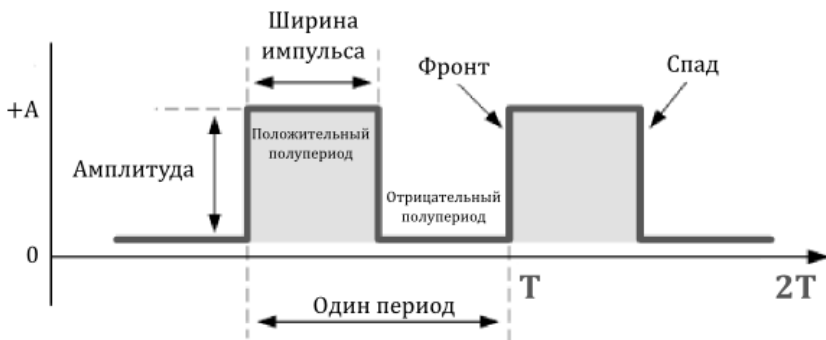


Рисунок 6 – Прямоугольный сигнал функции tone().

Так как форма меандра симметрична, и каждая половина цикла одинакова, то длительность положительной части импульса равна промежутку времени, когда импульс отрицателен (нулевой).

Время заполнения  $\tau$  равно половине периода сигнала. Так как частота равна обратной величине периода, ( $1/T$ ), то частота меандра:

$$f = \frac{1}{2\tau}$$

Для сигнала со временем заполнения равным 0.5 мс, его частота равна:

$$f = \frac{1}{(0.5 + 0.5) * 10^{-3}} = 1000 \text{ Гц}$$

Пьезоэлемент характеризуется следующими свойствами:

- а) Относительной диэлектрической постоянной
- б) Резонансной частотой
- в) Коэффициентами электромеханической связи
- г) Упругими постоянными
- д) Пьезоэлектрическими постоянными
- е) Коэффициентом Пуассона
- ж) Температурными коэффициентами



- з) Скоростью старения
- и) Механической добротностью
- к) Температурой Кюри
- л) Плотностью.

а) Относительные диэлектрические постоянные является отношением диэлектрической проницаемости материала к диэлектрической проницаемости вакуума

(в этом случае  $\epsilon_{33}^T$  и  $\epsilon_{11}^T$ )

$$\frac{\epsilon_{33}^{T(S)}}{\epsilon_0} \text{ и } \frac{\epsilon_{11}^{T(S)}}{\epsilon_0}, \text{ где } \epsilon_0 = 8,85 * 10^{-12}, \text{ Ф/м}$$

Верхний индекс показывает граничные условия, действующие на материал в процессе определения значения относительной диэлектрической постоянной. В частности, индекс Т (в этом случае) говорит о том, что диэлектрическая постоянная измеряется на свободном (не зажато) образце. А индекс S показывает, что измерения происходят при постоянной деформации пьезокерамики (в зажато состоянии). Первый нижний индекс показывает направление диэлектрического смещения, а второй – электрического поля. Формула расчета относительной диэлектрической постоянной следующая:

$$\frac{\epsilon_{ij}^T}{\epsilon_0} = \frac{tC}{\epsilon_0^2 S}$$

где  $\epsilon_{ij}^T$  – диэлектрическая проницаемость  
(одна из двух  $\epsilon_{11}^T$  или  $\epsilon_{33}^T$ )

t – расстояние между электродами, м,

S – площадь электрода м<sup>2</sup>,

C – емкость, Ф

б) Резонансная частота

Собственная частота пластины по толщине  $f_0$  вычисляется по следующей формуле

$$f_0 = \frac{c}{2t}$$

где c – скорость звука в материале, м/с

в) Коэффициенты электромеханической связи  $k_p$ ,  $k_{33}$ ,  $k_{15}$ ,  $k_t$  и  $k_{31}$  описывают способность пьезоэлемента превращать энергию из электрической в механическую и наоборот. Квадрат коэффициента электромеханической связи определяется как отношение накопленной преобразованной энергии одного вида (механической или электрической) к входной энергии второго вида (электрической или механической). Индекс показывает относительные направления электрических и механических величин и вид колебаний. Этот коэффициент может быть вычислен через резонансную и антирезонансную частоту по формуле.

$$k_t = \sqrt{\frac{f_a - f_r}{0.405(2f_a - f_r)}}$$

где  $f_r$  – резонансная частота, Гц,

$f_a$  - антирезонансная частота, Гц.

г) Упругие константы

Упругие свойства пьезоэлектрических материалов характеризуются упругими податливостями (упругие податливости) или упругими жесткостями (упругие жесткости). Упругая податливость определяет величину деформации, возникающей под воздействием приложенного механического напряжения. Ввиду того, что под воздействием механического напряжения керамика порождает электрический ответ, который противодействует результирующей деформации, эффективный модуль Юнга при коротком замыкании электродов меньше чем при холостом ходе. В дополнение, жесткость различна в разных направлениях, поэтому для точного определения величины указывается электрические и механические условия. Верхний индекс E говорит о том, что замеры происходят при постоянном электрическом поле (короткое замыкание). В то время как, индекс D указывает на граничное условие – постоянное электрическое смещение (индукция), т.е. замеры происходят при холостом ходе. Первая нижняя цифра показывает направление деформации, вторая направление механического напряжения.

д) Пьезоэлектрические постоянные  $d$  – отношение механической деформации к приложенному электрическому полю (Кл/Н)

$$d_{33} = \frac{\Delta x_s}{U_s}$$

где  $\Delta x_s$  – изменение толщины пластины, м,

$U_s$  – приложенное напряжение, В.

е) Коэффициент Пуассона – это отношение относительного поперечного сжатия к соответствующему относительному продольному удлинению

$$\mu = - \frac{\Delta a * l}{\Delta l * a}$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона,

$\Delta a$  – абсолютное приращение толщины, м,

$a$  – толщина после деформации, м,

$\Delta l$  – абсолютное приращение длины, м,

$l$  – длина после деформации, м.

ж) Температурный коэффициент показывает изменение различных свойств материала (резонансная частота, емкость, размеры) при изменении температуры

$$\text{ТКЧ} = \frac{1}{\Delta t} \frac{f(t_1) - f(t_2)}{f_{20}} * 10^6,$$

где ТКЧ – температурный коэффициент резонансной частоты,  $1/^\circ\text{C}$ ,

$f(t_1)$  – резонансная частота при температуре  $t_1$ , Гц,

$f(t_2)$  – резонансная частота при температуре  $t_2$ , Гц,

$f_{20}$  – резонансная частота при температуре  $20^\circ\text{C}$ , Гц,

$\Delta t$  – разница температур  $\Delta t = t_2 - t_1$ ,  $^\circ\text{C}$

$$\text{ТКЕ} = \frac{1}{\Delta t} \frac{C(t_1) - C(t_2)}{C_{20}} * 10^6,$$

где ТКЕ – температурный коэффициент емкости,  $1/^\circ\text{C}$ ,

$C(t_1)$  – емкость при температуре, Ф,

$C(t_2)$  – емкость при температуре, Ф,

$C_{20}$  емкость при температуре  $20^\circ\text{C}$ , Ф

$$\text{ТКЛР} = \frac{1}{\Delta t} \frac{l(t_1) - l(t_2)}{l_{20}} * 10^6,$$

где ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения,  $1/^\circ\text{C}$ ,

$l(t_1)$  – длина при температуре, м,

$l(t_2)$  – длина при температуре, м,

$l_{20}$  – длина при температуре 20°C, м.

з) Скорость старения — это показатель изменения резонансной частоты и емкости со временем. Чтобы вычислить эту скорость, после поляризации электроды преобразователя соединяются вместе, и образец нагревается определенный период времени.

$$(AR) = \frac{l}{\log t_2 - \log t_1} \frac{X_{t_2} - X_{t_1}}{X_{t_1}},$$

где  $AR$  – скорость старения для резонансной частоты или емкости,

$t_1, t_2$  – число дней после поляризации,

$X_{t_1}, X_{t_2}$  – резонансная частота или емкость через  $t_1$  и  $t_2$  дней после поляризации.

и) Механическая добротность

Добротность – количественная характеристика резонансных свойств колебательных систем, указывающая во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при резонансе, превышает амплитуду вынужденных колебаний на частоте много ниже резонансной при одинаковой амплитуде возбуждающей силы

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r Z_r C (f_a^2 - f_r^2)}$$

где  $Q_m$  – механическая добротность,

$f_r$  – резонансная частота, Гц,

$f_a$  – антирезонансная частота, Гц,

$Z_r$  – сопротивление при резонансе, Ом,

$C$  – емкость, Ф.

к) Температура Кюри – это температура при превышении которой пьезоэлектрический материал теряет свои свойства.

л) Плотность

$$\rho = \frac{m}{V}$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>,

$m$  – масса, кг,

$V$  – объем, м<sup>3</sup>.

Таким образом, с помощью функции `tone()` задавая выходной сигнал на порту вход/выход Arduino, мы изменяем интенсивность

колебаний пьезоизлучателя, тем самым получая требуемую частоту ультразвука

Для проведения данного исследования был создан скетч – код программы написанный в Arduino IDE и через порт USB загруженный в микроконтроллер. Далее представлен код программы:

```
#include <Wire.h> //Подключаем библиотеки для работы с
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // экраном и вспомогательной платой
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // Устанавливаем дисплей
int p = 3; //Объявляем переменную с номером пина,
void setup() // на который подключен пьезоэлемент
{
pinMode(p, OUTPUT); //Задаем 3 порт работать на выход
lcd.init();
lcd.backlight(); // Включаем подсветку дисплея
}
void loop(){
lcd.setCursor(0,1); //Устанавливаем курсор на вторую строку.
lcd.print("100 Hz"); //Выводим на экран 100 Гц
tone (p, 100); //Подаем сигнал в 100 Гц
delay(1000); //Ждем 1000 Мс
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("200 Hz");
tone (p, 200); // Подаем сигнал в 200 Гц
delay(1000);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("400 Hz");
tone (p, 400); // Подаем сигнал в 400 Гц
delay(1000);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("800 Hz");
tone (p, 800); // Подаем сигнал в 800 Гц
delay(1000);
lcd.setCursor(0, 1);
```

```
lcd.print("1000 Hz");  
tone(p, 1000);           // Подаем сигнал в 1000 Гц  
delay(1000); }
```

Таким образом, появление Arduino и совместимых к нему плат, открытость платформы и исходного кода, а также многообразие arduino-совместимых модулей и датчиков способствовало массовому распространению микроконтроллеров по всему миру и сделало доступным различные исследования на их основе и создание электронных устройств и систем.

### *Литература*

1. Ардуино. Блокнот программиста - В. Эванс, Москва 2008.
2. Пьезоэлектрические датчики, Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В., Москва 2006.
3. Интернет источник: Пьезоэлемент - <http://engineering-solutions.ru/ultrasound/piezomaterials/> Дата доступа: 30.05.2017.