

Měření teploty s kontrolou vzdálenosti

Seminární práce z fyziky

EKO GYMNÁZIUM BRNO o. p. s.



Jakub Sláma

7. 1. 2024

Vedoucí práce: Jana Suchomelová

Klíčová slova:

Česky:

měření, Arduino, IR sensor, Ultrazvuk, ultrazvuk vzdálenost, C++, pájení, HC-SR04, MLX-90614, leptání cuprextitu, Eagle, AutoCAD, plošný spoj, vrtání, rastr, leptací roztok, Proxon, výroba, konstrukce, prototyp, výkres, Stefan-Boltzmanův zákon, emisivita, senzory, programování, PWM, syntetický hlas, elektrotechnika

Anglicky:

measurement, Arduino, IR sensor, Ultrasound, ultrasound distance, C++, soldering, HC-SR04, MLX-90614, cuprextite etching, Eagle, AutoCAD, printed circuit, rise, raster, etching solution, Proxon, production, construction, prototype, drawing, Stefan-Boltzman law, emissivity, sensors, programming, PWM, synthetic voice, non-soldering field, electrical engineering,

Anotace

V následné seminární práci se autor zabývá konstrukcí měřicího přístroje, který vyhodnocuje vzdálenost a teplotu od objektu a následné informace zpracovává a podává je uživateli pomocí zvukového výstupu. Tohoto docílí pomocí používání senzorů MLX90614-DCI a HC-SR04, jejichž výstupy jsou zpracovávány pomocí desky arduino s čipem ATmega328, která zároveň vysílá signál, jenž řídí piezoelektrický měnič, jež zvukově sděluje tyto data v reálném čase. Zároveň dává náhled k 3D modelům, jež byly vytištěné na 3D tiskárně Prusa MK3S+ z polymeru PLA.

Annotation

In the subsequent seminar paper, the author addresses the construction of a measuring device that evaluates the distance and temperature from an object. Subsequently, it processes and conveys the information to the user through an auditory output. This is achieved by using the MLX90614-DCI and HC-SR04 sensors, whose outputs are processed using an Arduino board with the ATmega328 chip. Simultaneously, the board emits a signal that controls a piezoelectric transducer, which acoustically communicates this data in real-time. Additionally, the paper provides an overview of 3D models that were printed on a Prusa MK3S+ 3D printer using PLA polymer.

Obsah

1. Úvod	4
2. Teoretická část.....	5
2.1. Infračervený teplotní senzor MLX90614-DCI	5
2.1.1. Princip měření teploty pomocí IR	5
2.1.2. základní parametry senzoru MLX90614-DCI.....	6
2.2. Ultrazvukový měřič vzdálenosti HC-SR04	6
2.2.1. Princip měření vzdálenosti pomocí zvuku	6
2.2.2. HC-SR04 modul.....	7
3. Praktická část.....	7
3.1. Funkční vzorek	7
3.1.1. Popis funkčnosti	8
3.1.2. Nedostatky.....	9
3.2. Prototyp	9
3.2.1. Popis funkčnosti	9
3.3. Výroba plošného spoje	9
3.3.1. Výroba výkresu	9
3.3.2. Vrtání.....	10
3.3.3. Nakreslení drah na cuprexitu.....	11
3.3.4. Leptání.....	12
3.3.5. Finální úprava.....	13
3.4. 3D modelování krytu prototypu měřicího přístroje	13
3.5. Vyhodnocovací a řídicí část	14
4. Závěr.....	20
Bibliografie.....	21
Seznam obrázků a grafů:	21

1. Úvod

Práce se zabývá postupem konstrukce měřicího přístroje, jehož účelem je měření teploty a vzdálenosti objektu a sdělení těchto informací hlasovým výstupem. V této práci jsou popsány fyzikální principy použitých měřících senzorů, zároveň obsahuje i technologický postup výroby zařízení.

První část se zabývá teorií, jíž je třeba porozumět k pochopení jednotlivých principů využívaných při měření.

Druhá část je rozdělená na elektro, mechanickou a programovací část. V každé z těchto částí jsou vysvětleny mnou použité principy při výrobě a samotná funkce dané složky zařízení.

2. Teoretická část

2.1. Infračervený teplotní senzor MLX90614-DCI

2.1.1. Princip měření teploty pomocí IR

Každé reálné těleso vyzařuje tepelné záření v závislosti na jeho teplotě a absorpční schopnosti, která závisí mimo jiné i na barvě a teplotní kapacitě tohoto tělesa¹ (železo potřebuje méně energie k zahřátí o jeden stupeň kelvinu na kg, než voda viz vzorec).

$$Q = mc\Delta T$$

Q – teplo [J]

c – měrná tepelná kapacita látky (konstanta) (pro každý materiál jiná) [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]

m – hmotnost tělesa [kg]

ΔT – změna teploty tělesa [K]

$$c_{\text{železo}} = 452 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}, c_{\text{voda}} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Principu, že tělesa vyzařují toto tepelné záření, využívá i Stefan-Boltzmannův zákon, který říká: „*Intenzita vyzařování roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa.*“²

$$I = \sigma T^4$$

I – celková intenzita záření [W.m^{-2}]

σ - Stefan-Boltzmanova konstanta ($5,670\,374\,419 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$)

T – termodynamická teplota [K]

Infračervené teplotní senzory jsou založeny právě na tomto principu. Konkrétně na záření, které bylo takto vyzářeno v infračerveném spektru. Z důvodu, že Stefan-Boltzmannův zákon platí pro černá tělesa, tak se zavedla veličina emisivita (ϵ), která je určena podílem vyzařování tělesa reálného a černého.³ V praxi se poté přihlíží i k odrazivosti a průhlednosti

¹ (Záření černého tělesa, 2022)

² (Stefanův–Boltzmannův zákon, 2023)

³ (Měření teploty, 2023)

těles, které byly v této seminární práci zanedbány z důvodu, primárního měření těles, které nemají tyto vlastnosti.

Základní konstrukce infračervených senzorů se skládá z čoček, optických vláken a spektrálních filtrů. Tyto části zachycují záření a zároveň určují vzdálenost tělesa od senzoru, což je důležité, protože intenzita tepelného záření klesá s druhou mocninou vzdálenosti.

2.1.2. základní parametry senzoru MLX90614-DCI

Tento senzor se řadí do rodiny MLX90614, jež se vyznačuje relativně nízkou cenou a maximální odchylkou 0,5 °C, při rozmezí měřitelných teplot mezi -40 °C až +125 °C. Zároveň senzory od tohoto výrobce jsou již z výroby zkalibrované, čímž je eliminována možnost nepřesné kalibrace od uživatele. Pro přesnost měření je potřeba udržovat čidlo s měřeným objektem v izotermickém prostředí.

Po zapojení do obvodu vysílá senzor PWM signál, kde za pomoci šíře jednotlivých pulzů je možno určit teplotu objektu.⁴

Mnou vybraný senzor měří v zorném úhlu 5°, což je nejmenší běžně nabízený rozsah.

2.2. Ultrazvukový měřič vzdálenosti HC-SR04

2.2.1. Princip měření vzdálenosti pomocí zvuku

Rychlost šíření zvukového vlnění je závislá nejen na látce, ve které se šíří, ale i na teplotě, tlaku a vlhkosti. Zvuk ve vzduchu o teplotě 0 °C a běžné pokojové vlhkosti 50 % se šíří rychlostí 331,8 m.s⁻¹. To je doložitelné z rovnice:⁵

$$v = 331 + 0.6 t$$

v...rychlost [m.s⁻¹]

t...teplota [°C]

Tohoto principu se využívá při měření vzdálenosti pomocí zvukových vln, jelikož pokud víme, jaká doba uplyne od vyslání zvuku k jeho navrácení, tak lze pomocí níže uvedené rovnice určit vzdálenost objektu.

⁴ (Robojax.com, 2023)

⁵ (Šíření akustického vlnění, 2023)

$$s = (t * 0,034) / 2$$

s...vzdálenost od objektu [cm]

t...čas, za který byla uražena vzdálenost od měřidla k objektu a zpět[s]

0,034...konstanta, která určuje rychlost zvuku ve vzduchu

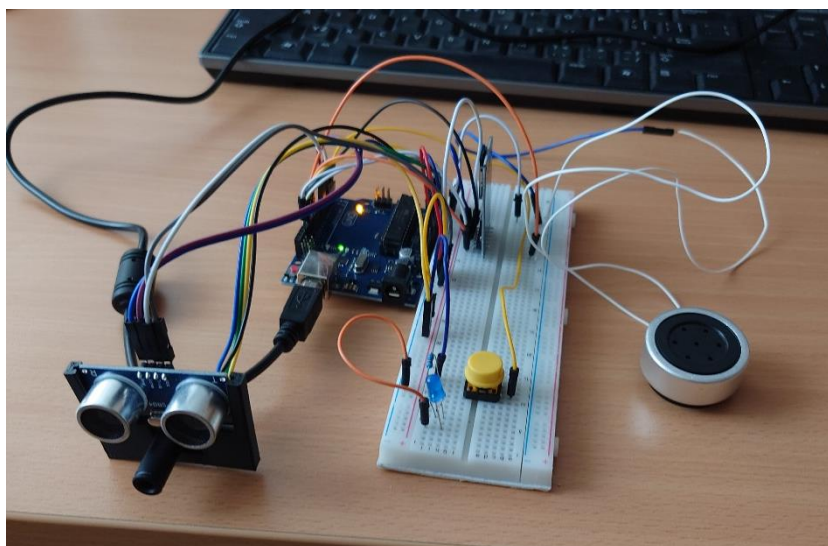
2... dráha je zvukem uražena 2x

2.2.2. HC-SR04 modul

Tento senzor na měření vzdálenosti používá ultrazvukové vlny s frekvencí 40 kHz a měří objekty až do vzdálenosti 4 m. Mnou používaný modul funguje na principu, vysílání pulzu s dobou trvání 5 μ s. A následně měří dobu návratu pulzu odraženého od objektu. Z této doby vypočteme vzdálenost od objektu⁶

3. Praktická část

3.1.Funkční vzorek

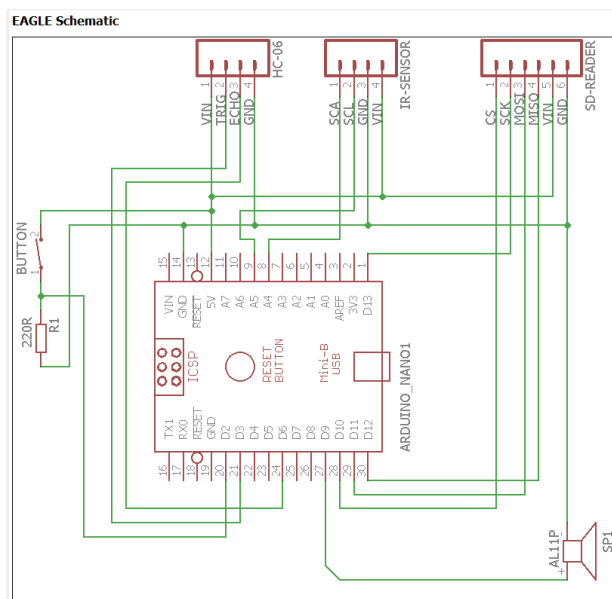


Obrázek 1- Funkční vzorek

⁶ (Eses ultrazvukový měřič vzdálenosti HC-04 pro jednodeskové počítače, 2023)

3.1.1. Popis funkčnosti

Funkční vzorek byl zkonstruován na nepájivé desce, z důvodu lehčí manipulace a možných dalších obměn. Zařízení funguje na principu, že při zmáčknutí tlačítka se dá signál desce Arduino Uno a ta vyčte a vyhodnotí informace ze senzorů vzdálenosti a teploty. Tyto informace poté pošle do připojeného stolního počítače a oznámí je i syntetickým hlasem.

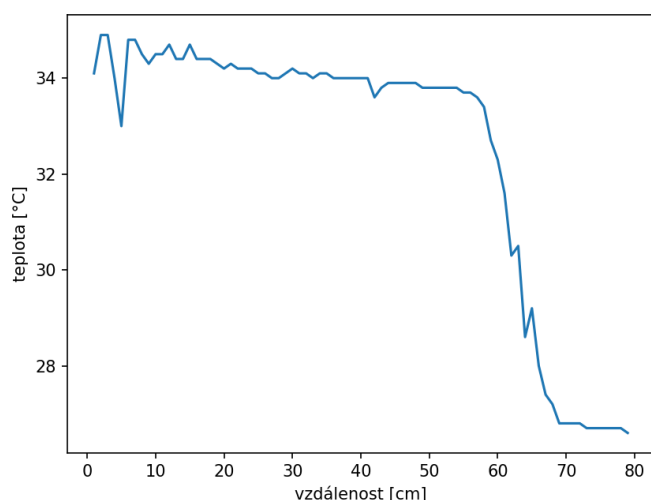


Obrázek 2- schéma funkčního vzorku

```
message (Enter to send message to Arduino Uno on COM)
Test
Vzdálenost: 6.00 cm, Teplota:32.55
0
6
```

Obrázek 3 - výpis do terminálu

Z prvních měření byl zjištěn možný rozsah vzdáleností měřeného objektu na přesnosti měření teploty mé ruky. Hodnoty jsou dále zanesené v příloženém grafu.



graf 1- naměřená teplota ruky ke její vzdálenosti od měřícího přístroje

Z měření vyplývá, že teplotní data ze senzoru jsou relevantní do vzdálenosti 55 cm a tudíž bylo nastaveno, že v případě příliš velké vzdálenosti čidla od měřeného objektu dostane uživatel informaci, že je příliš vzdálený od objektu.

3.1.2. Nedostatky

Nedostatky tohoto modelu jsou primárně v kvalitě a hlasitosti zvuku, který není téměř slyšet a zároveň uživatel neví, kam přesně senzor míří. Tyto nedostatky plánuji v další verzi vyřešit přidáním zesilovacího modulu a laseru pro upřesnění měřeného místa.

3.2. Prototyp

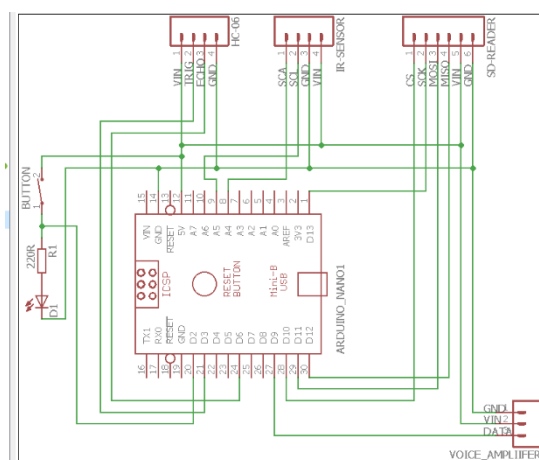
3.2.1. Popis funkčnosti

U prototypu bylo zařízení rozšířeno o zesilovací modul a laser, který ukazuje na měřený objekt. Vzhledem k tomu, že toto zařízení již fungovalo, tak jsem se rozhodl pro něj vytvořit plošný spoj.

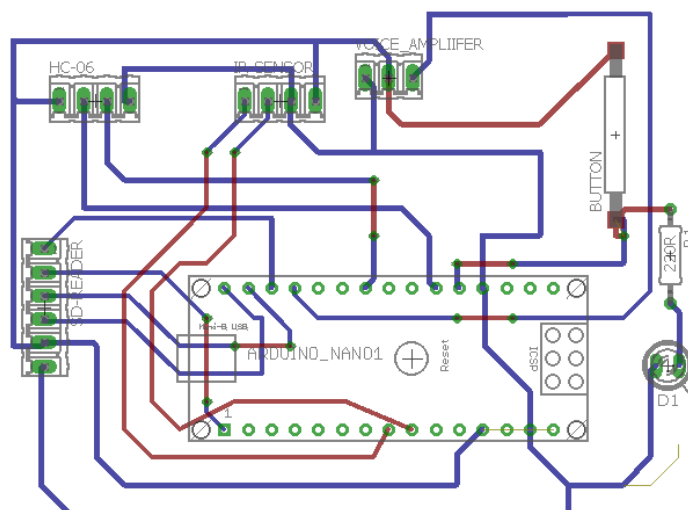
3.3. Výroba plošného spoje

3.3.1. Výroba výkresu

V prvním kroku se v aplikaci Eagle, která je určená pro modelování schémat obvodů a pro vývoj plošných spojů vytvoří náčrt, podle kterého se nanesou spoje na cuprexitovou desku.



Obrázek 4- schéma prototypu

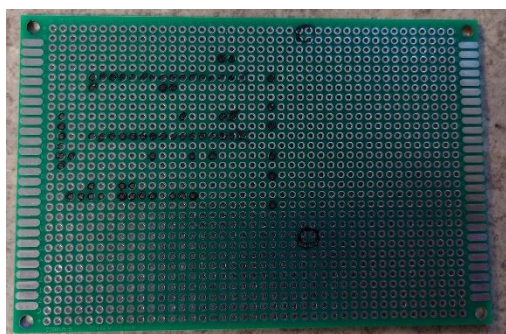


Obrázek 5- osazovací výkres s propojením součástek

Na obrázku číslo 5 jsou zaznačené budoucí spoje, kde modrá barva znázorňuje měděné spoje, červená spoje, jež budou propojeny dráty, a zelená otvory signalizují místa, která budou vrtána.

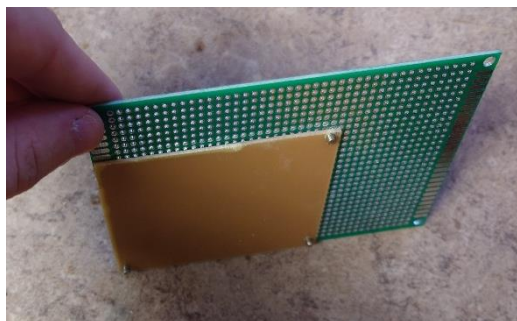
3.3.2. Vrtání

První krok byl na šabloně s roztečí 2,58 cm vyznačit díry pro vyvrtání, pomocí fixy, kvůli dosažení přesnosti rozteči děr kvůli vzdálenostmi mezi vývody součástek, tento krok je nezbytný, kvůli budoucímu osazení obvodu dutinkovými lištami s patnácti dírkami pro integraci Arduina.



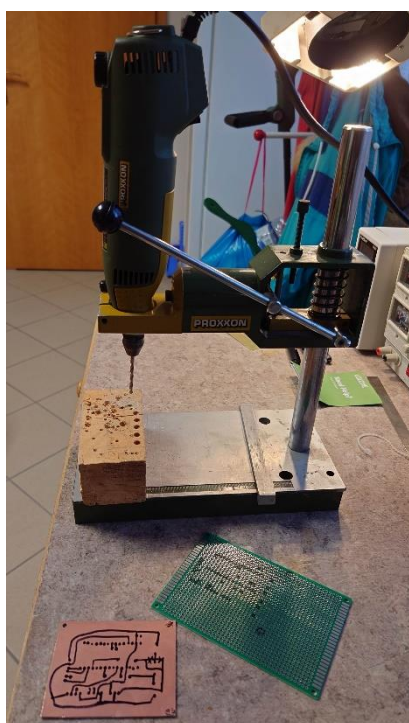
Obrázek 6- rastr

Poté byla zafixována cuprexitová deka svrtáním desky i rastru a sešroubováním obou těchto komponent šrouby a matickami.



Obrázek 7- svrtání šablony s cuprexitovou deskou

Následně bylo započato vrtání za použití vrtačky Proxon s nastavenou na 20 000 otáček za minutu a s vrtákem o průměru 0,8 mm.



Obrázek 8 – vrtání plošného spoje prototypu

Finálně byly zkontrolovány a očištěny díry před dalším postupem.

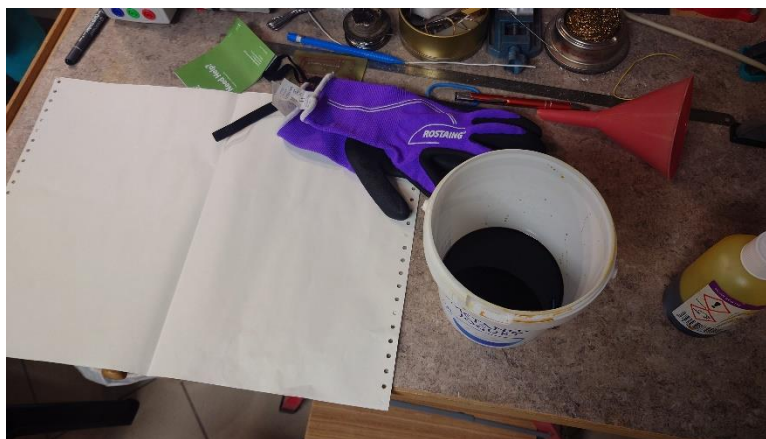
3.3.3. Nakreslení drah na cuprexitu

Nejprve byly pomocí technického lihu otřeny již provizorně načrtnuté spoje. Finální spoje se na měděnou část cuprexitu načrtnou pomocí speciální fixy na plošné spoje CCL s Anti-leptacím inkoustem.

3.3.4. Leptání

Při „leptání“ plošného spoje se používá princip takzvané Beketovovy řady. V našem případě používáme leptací roztok, který je složen z chloridu železitého, což je kapalina, ve které při styku s mědí proběhne reakce, jejíž výsledky jsou chlorid měďnatý a železo. Tato skutečnost v našem případě znamená, že tato kapalina odleptá přístupnou měď a zachová chráněnou část nedotčenou.

Jelikož tato kapalina je toxická a barví, tak byla při manipulaci s ní použita rukavice. Nejprve byla kapalina nalita do plastové nádoby a poté byl vložen plošný spoj. Celý proces leptání zabral zhruba 52 minut. Po skončení leptání byl vyjmut plošný spoj, následně byl omyt v umyvadle a utřen papírem.



Obrázek 10- potřeby k leptání



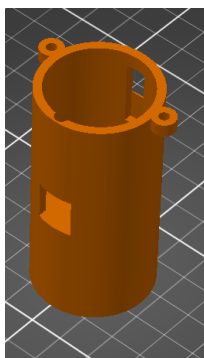
Obrázek 9- vyleptaný plošný spoj

3.3.5. Finální úprava

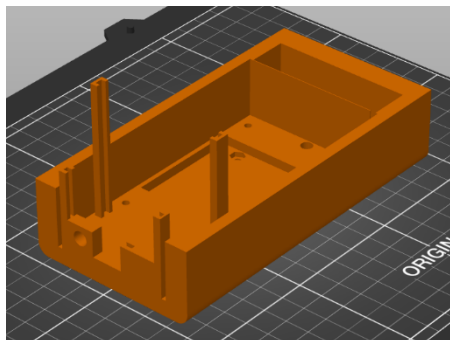
V poslední fázi se setře krycí fixa ze spojů pomocí lihu naneseného na kus látky či ubrousek, zkontroluje se na vodivost, izolaci a zkraty. Následně se do předvrtaných otvorů osadí součástky a poté se všechny měděné spoje zapájí pájkou, jako prevence oxidace vodivých drah.

3.4. 3D modelování krytu prototypu měřícího přístroje

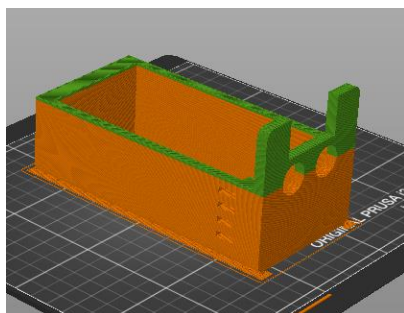
Všechny soubory byly vymodelovány v programu jménem AutoCAD a pro 3D tiskárnu byli převedeny soubory na G-code v PrusaSlicer a tisk je na Prusa MK3S+ pomocí filamentu PLA. Celý kryt měřícího přístroje se skládá ze 3 částí spodní, horní a držadla. Přičemž tyto části jsou spojené pomocí neodymových magnetů.



Obrázek 11 držadlo prototypu měřícího přístroje



Obrázek 12 spodní díl hlavní části prototypu



Obrázek 13 horní díl hlavní části prototypu

3.5. Vyhodnocovací a řídicí část

Data se vyhodnocují za pomoci programovatelného čipu Arduina, který se programuje v jazyce C++. Kód jsem psal pomocí programovacího modelu OOP (Object oriented programming), jež spočívá v rozdělení jednotlivých úkolů do specifických funkcí, které mohou být vyvolány opakovaně a tím se docílí menší náročnosti na úložnou kapacitu a na větší přehlednost kódu.

Nejprve byly importovány knihovny a nadefinovány konkrétní čísla používaných pinů.

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_MLX90614.h> // Library for IR sensor

//SD card pins
#include <SD.h> // need to include the SD library
//#define SD_ChipSelectPin 53 //example uses hardware SS pin 53 on Mega2560
#include <TMRpcm.h> // also need to include this library...
#include <SPI.h>

TMRpcm tmrpcm; // create an object for use in this sketch

//initialization vareables for temperature sensor
Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

// inicialization of pins for distance sensor
const int trigPin = 3;
const int echoPin = 6;
#define SD_ChipSelectPin 10 //using digital pin 10 on arduino nano 328, can
use other pins
```

Následně ve funkci setup() byly inicializovány používané piny, terminál a zapnuto čtení SD karty.

```
void setup() {
//initialization of button point
pinMode(2, INPUT);

// Setup pin for US sensor
pinMode(trigPin, OUTPUT); // Sets the trigPin as an Output
pinMode(echoPin, INPUT); // Sets the echoPin as an Input

//start serial monitor
Serial.begin(9600);
Serial.println("Test");
//begin mesuring temperature
```

```

    mlx.begin();

//inicializing speaker pin
    tmrpcm.speakerPin = 9;
    if (!SD.begin(SD_ChipSelectPin)) { // see if the card is present and can
be initialized:
        Serial.println("SD fail");
        return; // don't do anything more if not
    }
    tmrpcm.play("one.wav"); //the sound file "music" will play each time the
arduino powers up, or is reset
}

```

Ve funkci `getDistance()` je vzdálenost od objektu získávána pomocí senzoru HC-SR04 (princip vysvětlen v kapitole „*Princip měření vzdálenosti pomocí zvuku*“) a vrátím vzdálenost v cm.

```

float getDistance(){
    long duration;
    int distance;
    // Clears the trigPin
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    // Sets the trigPin on HIGH state for 10 micro seconds
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    // Reads the echoPin, returns the sound wave travel time in microseconds
    duration = pulseIn(echoPin, HIGH);

    distance = duration * 0.034 / 2; // Calculating the distance in cm

    return distance;
}

```

Ve funkci `getTemp()` je teplota od objektu získávána pomocí senzoru MLX90614-DCI (princip vysvětlen v kapitole „*Princip měření teploty pomocí IR*“) a vrácena teplota v stupních celsia.

```

//get temperature
float getTemp(){
    float tempObjectC;
    tempObjectC = mlx.readObjectTempC();
    return tempObjectC;
}

```

Funkce sayNumber(int num) se vstupním parametrem teplotou, která má říct, se stará o řečení čísel, jejichž zvukové soubory jsou nahrány na SD kartě, pomocí piezoelektrického měniče.

```
void sayNumber(int num){ //say number
    int decimal = num / 10 ;
    int rest = num % 10;

    if(decimal != 1){
        switch(decimal){
            case 2:
                tmrpcm.play("20.wav");
                delay(550);
                break;
            case 3:
                tmrpcm.play("30.wav");
                delay(550);
                break;
            case 4:
                tmrpcm.play("40.wav");
                delay(600);
                break;
            case 5:
                tmrpcm.play("50.wav");
                delay(550);
                break;
            case 6:
                tmrpcm.play("60.wav");
                delay(600);
                break;
            case 7:
                tmrpcm.play("70.wav");
                delay(800);
                break;
            case 8:
                tmrpcm.play("80.wav");
                delay(800);
                break;
            case 9:
                tmrpcm.play("90.wav");
                delay(800);
                break;
            case 10:
                tmrpcm.play("100.wav");
                delay(1200);
                break;
        }
    }
```



```

switch(rest){
  case 1:
    tmrpcm.play("1.wav");
    delay(500);
    break;
  case 2:
    tmrpcm.play("2.wav");
    delay(500);
    break;
  case 3:
    tmrpcm.play("3.wav");
    delay(500);
    break;
  case 4:
    tmrpcm.play("4.wav");
    delay(500);
    break;
  case 5:
    tmrpcm.play("5.wav");
    delay(500);
    break;
  case 6:
    tmrpcm.play("6.wav");
    delay(500);
    break;
  case 7:
    tmrpcm.play("7.wav");
    delay(500);
    break;
  case 8:
    tmrpcm.play("8.wav");
    delay(500);
    break;
  case 9:
    tmrpcm.play("9.wav");
    delay(500);
    break;
}

}
else{

  switch(num){
    case 10:
      tmrpcm.play("10.wav");
      break;
    case 11:
      tmrpcm.play("11.wav");

```

```

        break;
        case 12:
            tmrpcm.play("12.wav");
        break;
        case 13:
            tmrpcm.play("13.wav");
        break;
        case 14:
            tmrpcm.play("14.wav");
        break;
        case 15:
            tmrpcm.play("15.wav");
        break;
        case 16:
            tmrpcm.play("16.wav");
        break;
        case 17:
            tmrpcm.play("17.wav");
        break;
        case 18:
            tmrpcm.play("18.wav");
        break;
        case 19:
            tmrpcm.play("19.wav");
        break;
    }
    delay(1200);

}

Serial.println(decimal);
Serial.println(rest);
}

```

Následuje funkce `desideWhatToSay(int temp, int distance)`, jejíž vstupní parametry jsou teplota objektu a vzdálenost, pokud je vzdálenost větší jak 50 cm, tak odešle zprávu o příliš velké vzdálenosti, z důvodu vzdálenostního omezení měření IR senzoru (viz. Popis funkčnosti). V opačném případě řekne, jak je objekt vzdálený a jakou má teplotu.

```

void desideWhatToSay(int temp, int distance){
    if(distance <= 50){
        tmrpcm.play("objVz.wav");
        delay(1200);
        sayNumber(distance);
        delay(500);
        tmrpcm.play("cm.wav");
    }
}

```

```

    delay(1000);

    tmrpcm.play("TeJe.wav");
    delay(1000);
    sayNumber(temp);
    tmrpcm.play("stup.wav");
    delay(1000);

}
else{
    tmrpcm.play("VzPv.wav");
    delay(1500);
}
}

```

V poslední funkci loop() je hlídáno, zda nebylo zmáčknuto tlačítko (viz str. 9), v případě, že bylo, tak vyčte hodnoty pomocí funkcí getDistance() a getTemp() a následně vokálně reprodukuje tuto teplotu pomocí funkce decideWhatToSay().

```

void loop() {

    if (digitalRead(2) == HIGH) { //if button pin presed
        //get info from sensors
        float distance = getDistance();
        float temperature = getTemp();
        //Serial print and say all informations
        Serial.print("Vzdálenost: ");
        Serial.print(distance);
        Serial.print(" cm, Teplota:");
        Serial.println(temperature);

        decideWhatToSay(int(round(temperature)), int(distance));
    }

    delay(20);
}

```

Toto je celý kód, pokud čteme z vrchu dolů.

4. Závěr

S potěšením mohu konstatovat, že sestrojené zařízení funguje nejen podle mých očekávání, ale dokonce s větší přesností, než jsem očekával. Ukázalo se, že mé znalosti obecné fyziky, elektrotechniky a konstrukčních postupů při výrobě zařízení jsou pro konstrukci měřících přístrojů na této úrovni dostatečné.

Tento přístroj se může využívat při měření teploty objektů na vzdálenosti do 50 cm od něho.

Metody jsem zvolil dle očekávání správné, jelikož se tomuto tématu věnuji dlouhodobě.

Uživatelé mohou být lidé, jenž potřebují změřit teplotu. Například pacienti, lékaři, konstruktéři, kutilové, technici.

Bibliografie

Měření teploty. (23. 09 2023). Načteno z Wikiskripta :

https://www.wikiskripta.eu/w/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_teploty

Robojax.com. (23. 09 2023). Načteno z MLX90614 family Datasheet:

https://robojax.com/learn/arduino/robojax_MLX90614_Datasheet-Melexis.pdf

Stefanův–Boltzmannův zákon. (23. 09 2023). Načteno z Wikipedia:

https://cs.wikipedia.org/wiki/Stefan%C5%AFv%E2%80%93Boltzmann%C5%AFv_z%C3%A1kon

Záření černého tělesa. (23. 09 2022). Načteno z Wikiskripta:

https://www.wikiskripta.eu/w/Z%C3%A1%C5%99en%C3%AD_%C4%8Dern%C3%A9ho_t%C4%Bles

Seznam obrázků a grafů:

Obrázek 1- Funkční vzorek	7
Obrázek 2- schéma funkčního vzorku Obrázek 3 - výpis do terminálu	8
Obrázek 4- schéma prototypu	9
Obrázek 5- osazovací výkres s propojením součástek	10
Obrázek 6- rastr	10
Obrázek 7- svrtání šablony s cuprexitovou deskou.....	11
Obrázek 8 – vrtání plošného spoje prototypu	11
Obrázek 10- potřeby k leptání	12
Obrázek 9- vyleptaný plošný spoj	12
Obrázek 11 držadlo prototypu měřícího přístroje	13
Obrázek 12 spodní díl hlavní části prototypu.....	13
Obrázek 13 horní díl hlavní části prototypu	13
graf 1- naměřená teplota ruky ke její vzdálenosti od měřícího přístroje.....	8